

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université « Dr. Tahar Moulay » Saïda**  
**FACULTE DES SCIENCES**  
**DEPARTEMENT DE BIOLOGIE**



**Laboratoire de Biotoxicologie, Pharmacognosie  
Et Valorisation biologique des Plantes**

**MEMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME**

**DE MASTER EN BIOLOGIE**

***Spécialité : Biotechnologie végétale***

**Présentée par :**

**Melle. ADEM Asmaa**

**Melle. TAHIR Ahlem**

***Sur le thème intitulé:***

**Etude de quelques paramètres biochimiques et  
physiologiques chez l'orge, suite à une Bioaccumulation  
métallique**

**Soutenue le 16 /09 /2020 devant le jury composé de:**

<b>Mr. ADLI Djallal eddine</b>	<b>MCA</b>	<b>Université de Saïda</b>	<b>président</b>
<b>Mme. BENABDESSLEM Yasmina</b>	<b>MCB</b>	<b>Université de Saïda</b>	<b>Examinatrice</b>
<b>Mr. HACHEM Kadda</b>	<b>MCA</b>	<b>Université de Saïda</b>	<b>Encadreur</b>

**Année Universitaire : 2019-2020**



## *Remerciements*

*Avant tout, nous tenons à remercier le bon Dieu qui a illuminé notre chemin et qui nous a donné la force, ainsi que la bonne volonté pour achever le cursus universitaire et ce modeste travail.*

*Nous tenons à remercier chaleureusement, notre encadreur Mr. HACHEM Kadda pour son encadrement, sa précieuse aide, son appui et ses conseils.*

*Nous tenons à remercier fortement Mr. FIDAH el hadj, Qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire, son soutien inconditionnel et son encouragement ont été d'une grande aide.*

*Nous tenons aussi à exprimer nos vifs remerciements à toutes les personnes qui ont aidé tout au long de notre travail.*

*Notre respect aux membres du jury qui nous feront l'honneur d'examiner notre travail nous les remercie vivement.*

*Enfin nous remercions tous ceux qui ont aidé de près ou de loin.*



## *Dédicace*

*Nous dédions cet humble travail :*

*À nos parents*

*À tous les membres de nos familles sans aucune exception*

*À nos enseignants*

*À nos amis et collègues.*

**Abstract:**

The biological effectiveness and the productivity of plants are limited by the presence of heavy metals in the soil, which are widely used in industry and are mainly introduced into the human diet through the food chain. Among these metals is Aluminium which is toxic to plants and animal and human health.

Our work aims to evaluate the impact of Aluminium on barley. For this we followed the development of seeds subjected to a metallic stress, through a multitude of parameters: morphological, physiological and enzymatic; to elucidate the action of different concentrations of Aluminium on barley.

The results show that the effect of different concentrations of aluminum (25, 50, 75, 100  $\mu\text{M}$ ) on germination and growth is variable in the species studied. In general, the variety tested is sensitive to this metal in high concentrations. This sensitivity is marked on several levels: macroscopically by (a decrease in biomass and reduction in size), physiologically (a decrease in the content of chlorophyll pigments), biochemically (an accumulation of proteins and sugars, lipid peroxidation and activation of antioxidant enzymes (CAT) and (GSH) and also superoxide dismutase (SOD) in different organs of the barley plant.

**Key words:** Barley, Aluminum, metallic stress, CAT, GSH, SOD.

## ملخص:

إن الكفاءة البيولوجية والإنتاجية للنباتات محدودة بسبب وجود المعادن "الثقيلة" في التربة والتي تستخدم على نطاق واسع في الصناعة ويتم تقديمها بشكل رئيسي في النظام الغذائي للإنسان من خلال السلسلة الغذائية ، ومن بين هذه المعادن، الألمنيوم وهو شديد السمية على النباتات وصحة الحيوان والإنسان.

يهدف عملنا أيضا إلى تقييم تأثير الألمنيوم على الشعير. لهذا تابعنا تطور البذور بتعريضها للإجهاد المعدني وهذا من خلال العديد من العوامل: المورفولوجية و الفيزيولوجية والإنزيمية لتوضيح تأثير تركيزات مختلفة من الألمنيوم على الشعير.

أظهرت النتائج أن تأثير تراكيز مختلفة من الألمنيوم (25 ، 50 ، 75 ، 100 ميكرومولار) للإنبات والنمو متغير في الأنواع المدروسة. بشكل عام ، الصنف المختبر حساس لهذا المعدن بتركيزات عالية. وتتميز هذه الحساسية بشكل مجهري من خلال (انخفاض في الكتلة الحيوية وتقليل الحجم) ،من الناحية الفسيولوجية (انخفاض في محتوى أصباغ الكلوروفيل) ،والكيمياء الحيوية (تراكم البروتينات والسكريات ، بيروكسيد الدهون وتنشيط إنزيمات مضادات الأكسدة و أيضا ديسموتاز الفائق في أعضاء مختلفة من نبات الشعير.

**الكلمات المفتاحية :** الشعير، الألمنيوم، الإجهاد المعدني.

## **Résumé :**

L'efficacité et la productivité des plantes sont limitées par la présence des métaux lourds dans le sol, qui sont largement utilisés dans l'industrie et s'introduisent principalement dans l'alimentation humaine par le biais de la chaîne alimentaire. Parmi ces métaux, figure l'aluminium qui est toxique pour les plantes et la santé animal et humaine.

Notre travail a pour objectifs d'évaluer d'autre part, l'impact de l'aluminium sur l'orge. Pour cela nous avons suivi le développement des graines soumises à un stress métallique, à travers une multitude de paramètres: morphologiques, physiologiques et enzymatiques; afin d'élucider l'action de différentes concentrations d'aluminium sur l'orge.

Les résultats montrent que l'effet des différentes concentrations de l'aluminium (25, 50, 75, 100  $\mu\text{M}$ ) sur la germination et la croissance est variable chez l'espèce étudiée. D'une manière générale, la variété testée est sensible à ce métal en cas des hautes concentrations. Cette sensibilité est marquée sur plusieurs plans : macroscopiquement par (une diminution de biomasse et réduction de la taille), physiologiquement (une diminution de la teneur en pigments chlorophylliens), biochimiquement (une accumulation des protéines et des sucres, Peroxydation des lipides et une activation des enzymes antioxydants (CAT) et (GSH) et aussi la superoxyde-dismutase (SOD) dans différents organes de la plante de l'orge.

**Mots clés:** l'orge, Aluminium, stresse métallique, CAT, GSH, SOD.

## *Liste des Tableaux*

<b>Tableau (01) :</b> la taille des grains des céréales en millimètres.....	<b>08</b>
<b>Tableau (02) :</b> Masse des grains des céréales en milligrammes.....	<b>08</b>
<b>Tableau (03) :</b> Composition des glumelles de l'orge.....	<b>10</b>
<b>Tableau (04) :</b> Composition de l'albumen d'orge.....	<b>12</b>
<b>Tableau (05) :</b> Composition des parois de l'albumen amylicé de l'orge, du blé et du riz.....	<b>12</b>
<b>Tableau (06) :</b> différents stades de développements de l'orge ( <i>Hordeum vulgare L.</i> ).....	<b>19</b>
<b>Tableau (07) :</b> constituants biochimiques de l'orge en % de matière sèche.....	<b>21</b>
<b>Tableau (08) :</b> Propriétés physico-chimiques du chlorure d'aluminium, du nitrate d'Aluminium et du sulfate d'aluminium.....	<b>27</b>
<b>Tableau (9) :</b> Concentration moyenne en aluminium dans quelques aliments (mg / kg de Poids frais).....	<b>29</b>
<b>Tableau (10) :</b> La liste des codes E... à base d'aluminium peuplant nos étiquettes, autorisés par l'Union européenne, et les aliments dans lesquels on les trouve.....	<b>30</b>
<b>Tableau (11) :</b> Les différents sels d'aluminium et leurs rôles dans les produits cosmétiques.....	<b>32</b>
<b>Tableau (12) :</b> sels d'aluminium utilisés dans les vaccins.....	<b>34</b>
<b>Tableau (13) :</b> les caractéristiques agronomiques de la variété de l'orge Saida.....	<b>46</b>
<b>Tableau (14) :</b> les valeurs mesurées dans le dosage du catalase.....	<b>54</b>
<b>Tableau (15) :</b> Taux de germination des graines en fonction de la concentration en aluminium après une semaine d'exposition.....	<b>57</b>
<b>Tableau (16) :</b> l'effet du l'aluminium (25, 50, 75, 100 µM) sur l'évolution de la longueur du feuilles en fonction du nombre des jours.....	<b>58</b>
<b>Tableau (17) :</b> Effet du l'aluminium sur le contenu en pigments chlorophylle (a), chlorophylle (b), chlorophylle (a+b).....	<b>60</b>
<b>Tableau (18) :</b> Effet du l'aluminium sur la teneur en protéines solubles totales (en µg. g <sup>-1</sup> matière fraîche) des parties aériennes et des racines.....	<b>62</b>
<b>Tableau (19) :</b> Effet du l'aluminium sur la teneur en MDA au niveau des feuilles et des racines.....	<b>63</b>

## *Liste des figures*

<b>Figure (01) :</b> Vue ventrale et dorsale du grain d'orge.....	<b>09</b>
<b>Figure (02) :</b> Morphologie du grain d'orge.....	<b>10</b>
<b>Figure (03) :</b> Coupe transversale de grains de riz, de blé et d'orge. Observation par microscopie optique des différents tissus de grains de riz, de blé et d'orge.....	<b>13</b>
<b>Figure (04) :</b> Distinction entre l'orge à deux rangs et l'escourgeon.....	<b>15</b>
<b>Figure (05) :</b> Les dix principaux producteurs d'orge pour 2018.....	<b>23</b>
<b>Figure (06) :</b> Sources d'exposition humaine à la l'Al.....	<b>28</b>
<b>Figure (07) :</b> Les différentes formes d'aluminium dans l'eau.....	<b>36</b>
<b>Figure (08) :</b> Absorption quotidienne et distribution de l'Al dans l'organisme humain.....	<b>41</b>
<b>Figure (09) :</b> La désinfection des grains d'orge ( <i>Hordeum vulgare</i> ).....	<b>47</b>
<b>Figure (10) :</b> la germination dans des boites de pétri.....	<b>47</b>
<b>Figure (11) :</b> La courbe d'étalonnage utilisée (BSA 1mg/ml) pour le dosage des protéines...	<b>52</b>
<b>Figure (12):</b> principe du dosage du malondialdéhyde.....	<b>52</b>
<b>Figure (13) :</b> Taux de germination des graines en fonction de la concentration en aluminium après une semaine d'exposition.....	<b>57</b>
<b>Figure (14) :</b> l'effet du l'aluminium sur la croissance des feuilles (1 : les feuilles d'une plantes témoin ; 2 : une feuilles d'une plante C1).....	<b>58</b>
<b>Figure (15) :</b> l'effet du l'aluminium (25, 50, 75, 100 $\mu$ M) sur l'évolution de la longueur du feuilles en fonction du nombre des jours.....	<b>59</b>
<b>Figure (16) :</b> l'effet du l'aluminium (25, 50, 75, 100 $\mu$ M) sur l'évolution des racines en fonction du temps.....	<b>59</b>
<b>Figure (17) :</b> Effet du l'aluminium sur le contenu en pigments chlorophylles (a ; b ; a+b)...	<b>60</b>
<b>Figure (18) :</b> Effet du l'aluminium sur le contenu en sucres solubles dans les feuilles et racines de l'orge.....	<b>61</b>
<b>Figure (19) :</b> Effet du l'aluminium sur la teneur en protéines solubles totales (en $\mu$ g. $g^{-1}$ matière fraîche) des parties aériennes et des racines.....	<b>62</b>
<b>Figure (20) :</b> Effet du l'aluminium sur la teneur en MDA au niveau des feuilles et des racines.....	<b>63</b>
<b>Figure (21) :</b> Effet du l'aluminium sur l'activité catalase au niveau des feuilles et des racines.....	<b>64</b>
<b>Figure (22) :</b> Effet du l'aluminium sur le contenu du glutathion au niveau des feuilles et des	



racines.....	64
<b>Figure (23) : Effet du l'aluminium sur la production de l'anion superoxyde au niveau des</b>	
<b>feuilles et des racines.....</b>	<b>65</b>

## *Liste des abréviations*

**%** : Pourcentage

**µg** : microgramme

**µM** : Micromolar

**Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>**: Nitrate d'Aluminium

**Al(OH)<sub>3</sub>**: Hydroxyde d'aluminium

**Al**: Aluminium

**Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>**: Sulfate d'aluminium « Alun »

**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**: Oxyde d'aluminium

**Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>**: Silicate d'aluminium

**-AlCl<sub>3</sub>**: Aluminium chlorure hexahydraté

**AlCl<sub>3</sub>**: Chlorure d'aluminium

**AlH<sub>2</sub>O<sub>8</sub>PS** : Sulfate d'hydroxyphosphate d'aluminium

**AlPO<sub>4</sub>** : Phosphate d'aluminium

**ACH** : chlorhydrate d'aluminium

**ANSM** : Agence nationale de sécurité du médicament

**AMS** : Accelerator mass spectrometry

**BBC** : Bleu Brillant de Coomassie

**BSA** : Albumine sérum de bœuf

**°C**: Degré Celsius

**CaCO<sub>3</sub>** : Carbonate de calcium

**cm**: centimeter

**Ch** : Chlorophylle

**CAT** : catalase

**CO<sub>2</sub>** : Dioxyde de Carbone

**DCE** : Directive Cadre Eau

**DO** : Densité optique

**E.D** : Eau distillée

**ERO** : espèces réactives de l'oxygène

**FAO**: Food and Agriculture Organisation

**g** : Gramme

**GSH** : Glutathion

**ha**: Hectare

**HCl** : Chlorure d'hydrogène  
**Hg** : Mercure  
**HPV** : Papillomavirus Humain  
**H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>** : peroxyde d'hydrogène  
**InVS**: Institut de veille sanitaire  
**ITGC** : Institut Technique des Grandes Cultures  
**Kcal**: kilocalorie  
**Kg**: kilogramme  
**kPa**: kilopascal  
**l**: Litre  
**M** : millions  
**m<sup>3</sup>** : metre cube  
**Max** : Maximum  
**mg** : milligramme  
**Mg(OH)<sub>2</sub>** : Hydroxyde de magnésium  
**Min** : Minimum  
**ml** : Millilitre  
**mm Hg** : millimètre de mercure  
**mm** : millimètre  
**Moy** : Moyenne  
**MS** : Matière sèche  
**MDA** : Malondialdéhyde  
**ng** : Nanogramme  
**nm**: Nanomètre  
**NG**: Nombre de graines germées  
**NGG**: Nombre de graines mises à germer  
**NADPH** : Nicotinamide Adénine Dinucléotide Phosphate réduit  
**NBT**: Nitro Blue tétrazolium  
**OMS** : Organisation Mondiale de la Santé  
**O<sub>2</sub>** : Oxygène moléculaire  
**O<sub>2</sub><sup>•-</sup>** : Anion superoxyde  
**Pa** : pascal  
**PH** : potentiel hydrogène

**PME** : Petites et Moyennes Entreprises

**PMG** : poids de mille grains

**Pg/g** : pictogramme par gramme

**Pg/l** : Pictogramme par litre

**PM** : pico mole

**PBS** : Tampon phosphate Salin

**RGA** : Recensement Général de l'Agriculture

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

**SAU**: Surface Agricole Utile

**-SH** : Groupement sulphydryle

**SOD** : superoxyde-dismutase

**T** : Tonne

**TBA** : Acide thiobarbuturique

**TCA** : Acide trichloracétique

**UV** : Ultra-violet

**VG** : Vitesse de germination

## *Sommaire*

**Remerciements**

**Dédicace**

**Résumé**

**Liste des tableaux**

**Liste des Figures**

**Liste des Abréviations**

**Introduction.....01**

### **Synthèse bibliographique**

#### **Chapitre 1 : L'orge**

<b>1. Les céréales.....</b>	<b>04</b>
<b>1.1. Importance des céréales.....</b>	<b>04</b>
<b>1.1. a. La production céréalière.....</b>	<b>04</b>
<b>1.1. b. Les industries de transformations.....</b>	<b>04</b>
<b>1.1. c. La consommation.....</b>	<b>05</b>
<b>2. L'orge.....</b>	<b>05</b>
<b>2.1. Généralités sur l'orge.....</b>	<b>05</b>
<b>2.2. L'histoire de l'origine de l'orge.....</b>	<b>06</b>
<b>2.3. Description de la plante.....</b>	<b>06</b>
<b>2.3.1. Le système racinaire.....</b>	<b>07</b>
<b>2.3.2. Le système aérien.....</b>	<b>07</b>
<b>2.3.2.1. La tige.....</b>	<b>07</b>
<b>2.3.2.2. Les feuilles.....</b>	<b>07</b>
<b>2.3.2.3. L'appareil reproducteur.....</b>	<b>07</b>
<b>2.3.2.4. Le grain.....</b>	<b>08</b>
<b>2.4. Classification botanique de l'orge.....</b>	<b>13</b>
<b>2.5. Exigences de la culture.....</b>	<b>15</b>
<b>2.5.1. Exigences climatiques.....</b>	<b>15</b>
<b>2.5.2. Exigences édaphiques.....</b>	<b>16</b>
<b>2.5.3. Exigences hydriques.....</b>	<b>16</b>
<b>2.5.4. Les exigences culturales.....</b>	<b>16</b>
<b>2.5.4. a. Préparation du Sol.....</b>	<b>16</b>
<b>2.5.4. b. Semis.....</b>	<b>16</b>

2.5.4. c. La fertilisation.....	16
2.5.4. d. Entretien.....	17
2.6. Cycle de développement de l'orge.....	17
2.6.1. La période végétative.....	17
2.6.1.1. Phase semis-levée.....	17
2.6.1.2. Phase levée-début tallage .....	17
2.6.1.3. Phase début tallage- début montaison .....	18
2.6.2. La période reproductrice.....	18
2.6.3. La période de maturation.....	18
2.7. Les constituants biochimiques de l'orge.....	20
2.8. Importance et utilisation de l'orge.....	22
2.9. La production mondiale d'orge.....	23

## **Chapitre 2 : L'aluminium**

1. Généralités sur L'aluminium.....	25
2. Propriétés physico-chimique de l'aluminium.....	25
3. Sources d'exposition de l'aluminium.....	27
3.1. Dans l'alimentation .....	28
3.2. Les additifs alimentaires.....	29
3.3. L'eau du robinet .....	31
3.4. Dans les cosmétiques .....	31
3.5. Médicaments.....	33
4. Comportement de l'aluminium dans l'environnement.....	34
4.1. L'aluminium dans le sol.....	34
4.2. L'aluminium dans l'air.....	35
4.3. L'aluminium dans l'eau.....	35
5. Différentes utilisations de l'aluminium.....	36
6. Toxicité de l'aluminium sur les végétaux.....	38
7. Cinétique de l'aluminium dans l'organisme.....	39
7.1. Absorption de l'Al.....	39
7.1.1. Absorption par inhalation.....	39
7.1.2. Absorption par voie cutanée.....	40
7.2. Distribution de l'aluminium dans l'organisme.....	40
7.3. Élimination.....	41

<b>8. Toxicité de l'aluminium.....</b>	<b>41</b>
<b>8.1. Toxicité aiguë.....</b>	<b>42</b>
<b>8.2. Toxicité chronique.....</b>	<b>42</b>
<b>8.2.1. Effets neurologiques.....</b>	<b>42</b>
<b>8.2.2. Effets immunitaires et allergiques.....</b>	<b>43</b>
<b>8.2.3. Effets cancérigènes.....</b>	<b>43</b>

## **Partie expérimentale**

### **Chapitre 3 : Matériels et Méthodes**

<b>1. Matériel végétal.....</b>	<b>46</b>
<b>2. Condition de l'essai.....</b>	<b>46</b>
<b>3. Récoltes des plantes.....</b>	<b>48</b>
<b>4. Paramètres étudiés.....</b>	<b>48</b>
<b>4.1. Paramètres morphologiques.....</b>	<b>48</b>
<b>4.1.1. Pourcentage de germination.....</b>	<b>48</b>
<b>4.1.2. Vitesse de germination.....</b>	<b>48</b>
<b>4.1.3. Mesure des paramètres de croissance.....</b>	<b>48</b>
<b>a. Nombre moyen des feuilles.....</b>	<b>48</b>
<b>b. Longueur moyen des feuilles.....</b>	<b>49</b>
<b>c. Nombre moyen des racines.....</b>	<b>49</b>
<b>d. Longueur moyenne des racines.....</b>	<b>49</b>
<b>4.2. paramètres biochimiques.....</b>	<b>49</b>
<b>4.2.1. Détermination des concentrations des pigments photosynthétique.....</b>	<b>49</b>
<b>4.2.2. Détermination des concentrations des sucres solubles totaux.....</b>	<b>50</b>
<b>4.2.3. Dosage des protéines.....</b>	<b>50</b>
<b>4.2.3.1. Préparation de l'échantillon.....</b>	<b>50</b>
<b>4.2.3.2. Préparation de réactif de Bradford.....</b>	<b>51</b>
<b>4.2.3.3. Préparation de la solution mère.....</b>	<b>51</b>
<b>4.2.4. Evaluation de la peroxydation lipidique (dosage du MDA).....</b>	<b>52</b>
<b>4.2.5. Exploration du stress oxydant.....</b>	<b>53</b>
<b>4.2.5.1. Préparation de l'extrait enzymatique.....</b>	<b>53</b>
<b>4.2.5.2. Détermination de l'activité de la catalase.....</b>	<b>53</b>
<b>4.2.5.3. Dosage de glutathion (GSH).....</b>	<b>54</b>
<b>4.2.5.4. Dosage de l'activité superoxyde-dismutase (SOD) (EC 1.15.1.1).....</b>	<b>55</b>

## **Chapitre 4 : Résultats et interprétations**

<b>Résultats.....</b>	<b>57</b>
<b>1. L'effet du l'aluminium sur les paramètres morphologiques.....</b>	<b>57</b>
<b>1.1. L'effet du l'aluminium sur la germination.....</b>	<b>57</b>
<b>1.2. Effet du l'aluminium sur la croissance.....</b>	<b>58</b>
<b>1.2.1. Effet du l'aluminium sur la croissance des feuilles de l'orge.....</b>	<b>58</b>
<b>1.2.2. Effet du l'aluminium sur l'évolution des racines.....</b>	<b>59</b>
<b>2. L'effet du l'aluminium sur les paramètres biochimiques.....</b>	<b>60</b>
<b>2.1. Influence du l'aluminium sur la synthèse des pigments photosynthétique.....</b>	<b>60</b>
<b>2.2. Influence du l'aluminium sur la teneur en sucres.....</b>	<b>61</b>
<b>2.3. L'effet du l'aluminium sur le taux des protéines totales.....</b>	<b>61</b>
<b>2.4. L'effet du l'aluminium sur la teneur en Malondialdéhyde (MDA).....</b>	<b>62</b>
<b>2.5. L'effet du l'aluminium sur les enzymes antioxydants.....</b>	<b>63</b>
<b>2.5.1. L'effet du l'aluminium sur le taux du catalase.....</b>	<b>63</b>
<b>2.5.2. L'effet du l'aluminium sur le contenu du glutathion.....</b>	<b>64</b>
<b>2.5.3. L'effet du l'aluminium sur la synthèse de l'anion superoxyde (<math>O_2^{\cdot -}</math>).....</b>	<b>65</b>

## **Chapitre 5 : Discussion**

<b>Discussion.....</b>	<b>67</b>
<b>Conclusion et perspectives.....</b>	<b>71</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>74</b>



# Introduction

## Introduction :

La pollution des sols par les métaux lourds est un enjeu environnemental qui constitue un problème dans le monde entier. Depuis le début de la révolution industrielle, la pollution de l'environnement, y compris le sol, avec les métaux toxiques a accéléré de façon spectaculaire. Les activités urbaines, industrielles et agricoles sont responsables d'une contamination croissante des sols et de l'eau par les ions métalliques. Leur accumulation dans le sol peut entraîner une augmentation des risques liés à l'exposition des êtres vivants : microorganismes, plantes, animaux, et de l'homme qui se situe à la fin de la chaîne alimentaire (**Yanai et al., 2006**).

Parmi les polluants que l'on lie au risque sanitaire, l'Aluminium est toujours impliqué dans les études établissant les causes des maladies neuro-dégénératives telles que la maladie d'Alzheimer (**Shaw et Tomljenovic, 2013**). L'aluminium (Al) est le métal le plus abondant dans la croûte terrestre. Il est libéré dans l'environnement par des processus naturels d'érosion des sols, d'éruptions volcaniques et d'actions anthropiques. La bauxite est la source la plus importante, contenant 55% de l'oxyde d'Al (**Ferreira et al., 2008**).

C'est dans ce contexte que se situe le présent travail dont l'objectif majeur est d'étudier les effets d'une pollution métallique par l'aluminium sur une céréale d'orge (*Hordeum vulgare*). Ceci dans le but de connaître ses effets sur la germination et la croissance, phases très importantes dans la production végétale. Par ailleurs, nous avons également étudié des paramètres physiologiques, biochimiques et enzymatiques pour déterminer la sensibilité de cette variété vis-à-vis à ce polluant.

Le travail présenté se compose de cinq chapitres :

- le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur le modèle biologique utilisé dans notre travail l'orge (*Hordeum vulgare*).
- Le deuxième chapitre concerne la pollution par les métaux toxiques notamment l'aluminium et ses effets sur les êtres vivants.
- le troisième chapitre est réservé au matériel et méthodes utilisées dans cette investigation, le déroulement des expériences, les doses de l'aluminium préconisées et les techniques et protocoles de dosages des variables.
- le quatrième et le cinquième chapitre sont consacrés aux résultats et discussion obtenus lors de cette Mémoire et enfin on termine avec une conclusion générale.

# Synthèse bibliographique

# Chapitre 1 : L'orge

## 1. Les céréales :

Les céréales ont de tout temps été la base de l'alimentation humaine. En effet, selon **(ST Pierre et Gendron, 1982, cité par RAHAL, B.H., 2006)**. La culture des céréales est antérieure à tout manuscrit sur l'histoire de l'homme. Le mot <<céréale>> souligne les mêmes auteurs, provient du latin<<cerealis>>.

Les Romains nommaient ainsi les cultures d'orge et de blé dont les grains moulus produisaient la farine du pain. Selon **(Parry M.L., Parry C.J., 1993, cité par RAHAL, B.H., 2006)**, l'orge est probablement la céréale la plus ancienne.

Au plan mondial, vers la fin des années 80, selon la FAO, l'orge figure au quatrième rang des céréales après le blé, le riz et le maïs **(Jestin, 1992, cité par RAHAL, B.H., 2006)**.

### 1.1.Importance des céréales :

Les céréales et leurs dérivées constituent l'alimentation de base dans beaucoup de pays en développement, particulièrement dans les pays maghrébins.

En Algérie, les produits céréaliers occupent une place stratégique dans le système alimentaire et dans l'économie nationale. Cette caractéristique est perçue d'une manière claire à travers toutes les phases de la filière céréalière **(Abdelkader, 2009)**.

#### 1.1. a. La production céréalière :

La production des céréales, jachère comprise, occupe environ 80% de la superficie agricole utile (SAU) du pays, La superficie emblavée annuellement en céréales se situe entre 3 et 3 ,5 million d'ha. Les superficies, annuellement récoltées représentent 63% des emblavures.

Elle apparait donc comme une spéculation dominante. Pratiquée par la majorité des exploitations (60% de l'effectif global (RGA, 2001), associé à la jachère dans la majorité des exploitations.

Spéculation présente dans tous les étages bioclimatiques, y compris dans les zones sahariennes.

En matière d'emploi, plus de 500 000 emplois permanents et saisonniers sont procurés par le système céréalier **(Abdelkader, 2009)**.

#### 1.1. b. Les industries de transformations :

L'industrie de transformation occupe une place « leader » dans le secteur des industries agroalimentaires, en raison des capacités importantes de triturations dont elle dispose; (+230%) par rapport à la taille du marché domestique, réparties entre les moulins publics

(95%) et privés (135%), soit respectivement une capacité de trituration de l'ordre de 19000 et de 27000 T/jour.

L'industrie céréalière privée compte actuellement 253 PME privés qui contrôlent 80% du marché domestique en 2005 (**Abdelkader, 2009**).

### **1.1. c. La consommation :**

La consommation des produits céréaliers se situe à un niveau d'environ 205 kg /ha /an. Les céréales et leurs dérivés constituent l'épine dorsale du système alimentaire algérien, et elles fournissent plus de 60% de l'apport calorifique et 75 à 80% de l'apport protéique de la ration alimentaire. C'est ainsi, au cours de la période 2001-2003, les disponibilités des blés représentent un apport équivalent à 1505,5Kcal/personne/jour, 45,533 g de protéine /personne/j et 5,43 g de lipide/personne /J (**Abdelkader, 2009**).

## **2. L'orge :**

### **2.1. Généralités sur l'orge :**

L'orge (*Hordeum vulgare L.*) est une céréale à paille qui appartient à la famille des graminées (**MOSSAB, M., 2007**). Elle est avec le blé, cultivée par l'homme depuis plus de 10 000 ans ce qui en fait une des plus anciennes céréales de grande culture (**Jean-Luc, R., 2011**). L'orge est un aliment important dans plusieurs régions du monde telles que l'Afrique du Nord, le proche Orient, l'Asie, etc. Il joue également un rôle primordial non seulement en alimentation humaine, mais également comme aliment de bétail en période hivernale lorsque le déficit fourrager est grand et le prix du fourrage est élevé. L'orge offre l'avantage de pouvoir être menée en double exploitation: première récolte en vert (pâturage ou fauche) suivie d'une récolte en grain (**HALLAB et RAHMOUNI, 2016**). Elle est posséder de plus une composition biochimique adaptée pour son utilisation en malterie/brasserie avec une production enzymatique (amylases, protéases, glucanases,..) (**Jean-Luc, R., 2011**).

L'importance agronomique de l'orge est due à sa grande faculté d'adaptation climatique et édaphique. C'est une espèce qui peut être cultivée dans des zones semi-arides où elle peut remplacer avantageusement le blé et donner de meilleurs rendements. En Algérie, la production et les rendements de cette culture sont fortement liés aux conditions climatiques (**HALLAB et RAHMOUNI, 2016**).

L'orge est considérée comme une culture expérimentale modèle en raison de sa courte durée de vie et de ses caractéristiques morphologiques, physiologiques et génétiques. Les preuves archéologiques indiquent que l'orge était autre fois plus importante que le blé dans les civilisations agricoles et qu'elle était principalement cultivée pour la consommation humaine.

Mais aujourd'hui, elle occupe la quatrième place dans la production céréalière mondiale après le blé, le riz et le maïs, et est principalement utilisée pour l'alimentation animale (environ 85% de la production mondiale) (Schulte et al., 2009).

## 2.2. L'histoire de l'origine de l'orge :

L'orge cultivée est originaire de la région du Croissant fertile au Proche-Orient. L'orge est issue de l'orge sauvage (*Hordeum vulgare subsp. spontaneum*). On collecta l'orge sauvage déjà vers 48 000 av. J.-C. (Lev et al., 2005, cité par Zohary et al., 2012). Au Proche Orient on trouve des vestiges d'orge sauvage et d'amidonner sauvage (*Triticum turgidum subsp. dicoccoides*) de la période vers 21 000 av. J.-C (Kislev, 1992, cité par Zohary et al., 2012). Les épis des céréales sauvages sont cassants et ils se désagrègent en parties distinctes lors du mûrissement, en commençant par le haut de l'épi. Les fleurs de l'orge sauvage s'ouvrent davantage que celle de l'orge cultivée, voici pourquoi le taux d'allogamie peut s'élever à 10%. On trouve les premières formes à rachis coriace dès env. 8000 av. J-C (Zohary et al., 2012). Certes, l'orge sauvage est disposée sur 6 rangs, à l'état sauvage pourtant elle ne se retrouve qu'à 2 rangs. L'orge cultivée à 2 rangs (*H. vulgare subsp. distichon*) est issue de l'orge sauvage à 2 rangs. Puis par le biais de mutations naquit l'orge cultivée à 6 rangs (*H. vulgare subsp. vulgare*). Les formes à 2 et 6 rangs sont génétiquement presque identiques. Deux gènes sont connus pouvant rétablir la fécondité des fleurs stériles alignées latéralement de l'orge à 2 rangs (Bothmer et al., 2003). Les formes à 2 rangs forment généralement plus de pousses que celles à 6 rangs qui tallent peu. En revanche, le chaume de la forme à 6 rangs est plus épais (Peer, 2013).

## 2.3. Description de la plante :

L'orge (*Hordeum vulgare* L.) est une plante annuelle de 50 cm à 1 mètre, se sème ordinairement avant l'hiver, glabre, à tiges dressées, robustes, racine fibreuse, et feuilles planes, larges, auriculées, rudes.

L'orge est caractérisé par une ligule courte, tronquée, et un appareil reproducteur formé de fleurs groupées en inflorescences, constitue un ensemble d'unités appelées épillets, qui sont tous fertiles, sessiles, aristés, imbriqués sur 4 rangs, dont les latéraux plus saillants.

L'épi est constitué d'un axe (rachis) à long de 6-10 cm, un peu comprimé, inégalement tétragonal, à la fin penché. La floraison a lieu entre Mai et juillet.

Le grain d'orge est un caryopse ovale à glumelles presque égales, à arêtes dressées longues de 10-20 cm, Les glumes sont linéaires, atténuées en arête dépassant les fleurs (L'Abbé Cost, 2011).

### 2.3.1. Le système racinaire :

Il est de type fasciculé, composé de deux systèmes qui se forment au cours de développement :

- Un système primaire ou séminal est fonctionnel de la germination à la ramification de la plantule<<tallage>> (**Belaid, D., 1986, cité par KOLAI, T., 2008**).
- Un système secondaire ou système de racines coronaires apparaît à la ramification de la plante <<tallage>>.

### 2.3.2. Le système aérien :

#### 2.3.2.1. La tige :

Sur la partie aérienne des céréales, on distingue une tige principale appelée le maître brin et des tiges secondaires appelées talles qui naissent à la base de la plante (**Gondé et Jussiaux, 1980; Boulal et al., 2007, cité par Kellil, 2010**). Les nœuds sont des zones méristématiques à partir desquelles s'allongent les entre nœuds. Chaque nœud est le point d'attache d'une feuille. Les entre-nœuds sont les parties de la tige situées entre les nœuds; généralement les entre-nœuds sont creux chez les blés tendres, l'orge et l'avoine, ils sont pleins chez les blés durs (**Belaid, D., 1996, cité par Kellil, 2010**).

L'orge est caractérisée par un fort tallage herbacé (**Boulal et al., 2007, cité par BOUNGAB, K., 2013**).

#### 2.3.2.2. Les feuilles :

Comme chez toutes les graminées, la présence et la forme des oreillettes ou stipules et de la ligule, au point d'insertion de la feuille autour de la graine, permet de déterminer l'espèce de la plante examinée, avant l'apparition de l'épi (**Soltner, 1999, cité par Kellil, 2010**).

Les feuilles 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 est (le limbe) (**Belaid, 1996, cité par Kellil, 2010**). La gaine de chaque feuille s'insère à partir du nœud d'où prend naissance la feuille. Les stipules ou oreillettes se trouvent à l'intersection entre le limbe et la gaine. L'orge présente des oreillettes longues embrassantes et toujours glabres (**Boulal et al., 2007, cité par Kellil, 2010**).

#### 2.3.2.3. L'appareil reproducteur :

L'orge est une plante autogame. Les fleurs sont groupées en inflorescences formant un ensemble d'unités morphologiques de base qui sont les épillets (**Belaid, 1996, cité par KOLAI, T., 2008**).



### 2.3.2.4. Le grain :

Le grain d'orge est un fruit sec indéhiscant (caryopse) de section arrondie ou ovale, de taille et de poids variable selon les espèces et les variétés (**tableau 1 et2**) (**Godon, 1991, cité par ZAIRI, M., 2015**). Une des particularités intéressantes de l'orge est d'être un grain vêtu. Les glumelles adhérentes au grain.

Espèces	Longueur			Largeur			Epaisseur		
	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max
Avoine	10,0	14,0	18,0	2,5	3,0	3,5	2,0	2,4	2,8
Blé	5,0	6,0	8,5	1,6	2,9	4,7	1,5	2,3	3,5
Mais	6,0	11,5	17,5	5,0	8,0	11,0	2,7	5,0	8,0
<b>Orge</b>	<b>8,0</b>	<b>10,0</b>	<b>12,0</b>	<b>2,7</b>	<b>4,1</b>	<b>5,0</b>	<b>1,8</b>	<b>3,5</b>	<b>4,5</b>
Seigle	5,0	7,5	10,0	1,5	2,2	3,5	1,5	2,5	3,0
Triticale	5,0	7,0	9,5	1,5	2,0	4,0	1,5	2,5	3,5

**Tableau 01** : la taille des grains des céréales en millimètres.

Espèces	Minimum	Moyenne	Maximum
Avoine	19	30	42
Blé	15	45	70
Mais Gros grain	163	273	382
Moyen grain	66	104	143
Petit grain	43	67	90
<b>Orge</b>	<b>25</b>	<b>40</b>	<b>52</b>
Seigle	13	30	50
Triticale	14	40	65

**Tableau 02:** Masse des grains des céréales en milligrammes.

Le grain d'orge présente une nervure médiane et deux nervures latérales dorsales. Il est prolongé par une barbe. Alors, que la glumelle supérieure correspond à la face ventrale du grain. Celui-ci présente une dépression ou sillon à la base duquel est insérée une baguette (**Figure 01**).

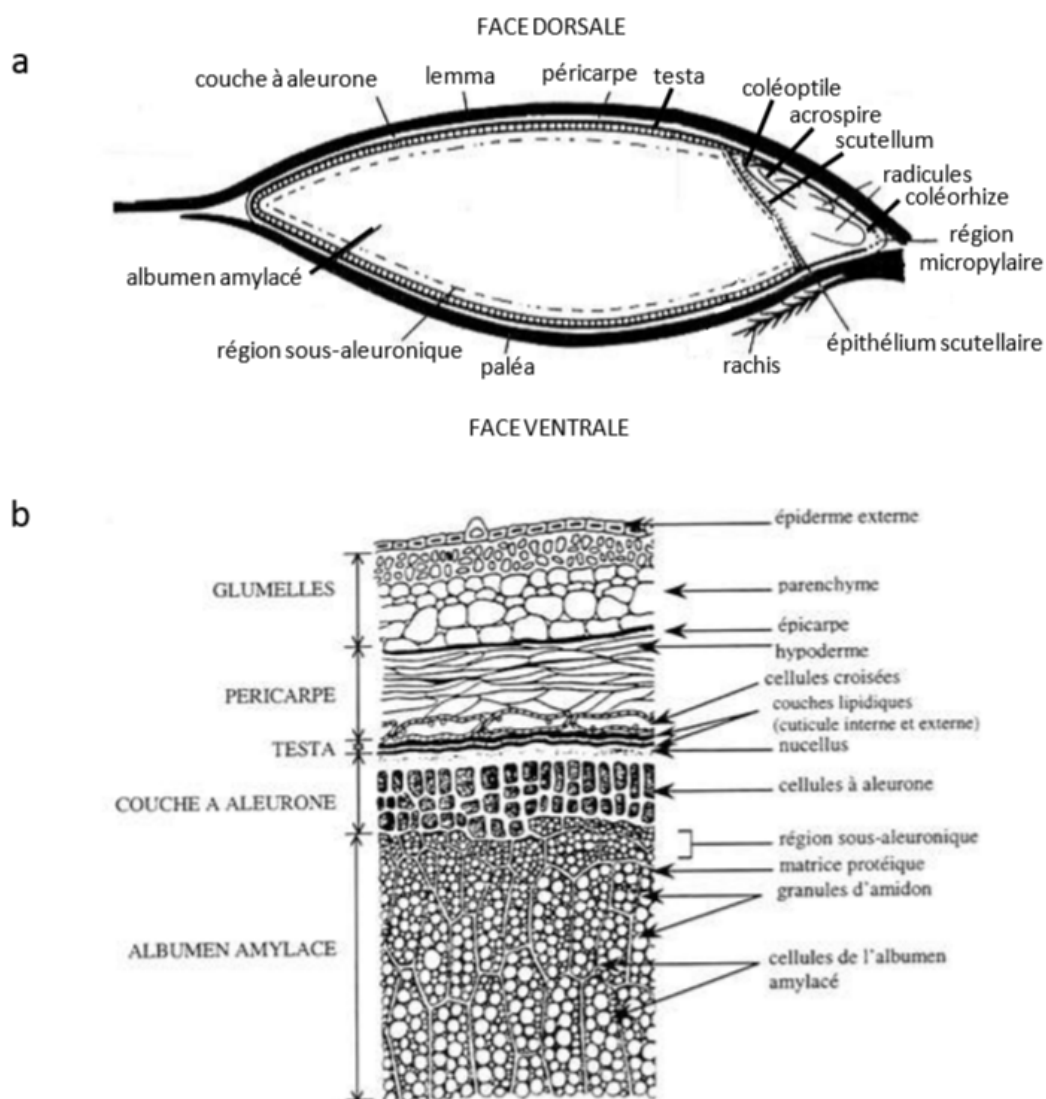
Il comporte plusieurs parties distinctes : les enveloppes organisées en plusieurs assises (testa, péricarpe, glumelles), l'embryon, la couche à aleurone et l'albumen amylicé (**Figure 2a**).



**Figure 01** : Vue ventrale et dorsale du grain d'orge. (ZAIRI, M., 2015).

**a. Les glumelles :**

Les glumelles constituent l'enveloppe externe du grain d'orge et représentent environ 10 % de son poids sec. On distingue les glumelles dorsales (lemma) des ventrales (palea). Les glumelles sont principalement formées de cellulose (20 %), d'hémicellulose (30-45 %) et de lignine (10-20 %) (Tableau 03) (Moldes et al., 2002; Höije et al., 2005). Elles contiennent également des polyphénols qui influencent la stabilité colloïdale de la bière. Les enveloppes jouent un rôle important puisqu'en malterie elles protègent la plumule (ou acrospire), qui se développe au cours de la germination, contre les chocs durant le procédé de maltage (Jean-Luc, R., 2011).



**Figure 02 :** Morphologie du grain d'orge. (a) Coupe longitudinale d'un grain d'orge. (b) coupe transversale des enveloppes, de la couche à aleurone et de l'albumen amylicé d'un grain d'orge (D'après Briggs, 1998).

D'après	Moldes et al. 2002, Cruz et al. 2007	Hoije et al. 2005
Hémicellulose	32,7 %	46,0 %
Cellulose	23,0 %	21,0 %
Lignine	21,4 %	12,0 %
Protéines	-	10,0 %
Amidon	-	8,0 %
Lipides	-	3,0 %
Autres	22,9 %	

**Tableau 03 :** Composition des glumelles de l'orge.

**b. Le péricarpe :**

Le péricarpe est composé de plusieurs types de cellules qui se situent entre les glumelles et la testa. Il est séparé des glumelles par une couche protectrice cuticularisée appelée épicarpe et est soudé à la testa (aussi appelé tégument séminal) (**Figure 2b**). Cette couche agit comme une membrane semi-perméable permettant les échanges gazeux. Sur sa face externe, le péricarpe est formé de l'hypoderme et sur sa face interne, de cellules croisées de forme rectangulaire et situées près de la testa (**Figure 2b, Figure 3**). La testa est entourée de deux zones cuticulaires, la plus interne issue du tissu nucellaire étant plus fine que la plus externe qui est issue des cellules de la testa (**Briggs, 1998**).

**c. L'embryon :**

Situé dans la partie dorsale de la graine, les deux composants majeurs de l'embryon sont l'axe embryonnaire qui formera la plantule au cours de la germination et le scutellum qui aura un rôle dans la synthèse d'enzymes et le transfert des nutriments de l'albumen vers l'embryon lors du développement du grain. A maturité l'embryon se divise en trois régions : la tige (coléoptile), le mésocotyle et les racicules enveloppées dans le coléorhize. Le mésocotyle et l'axe embryonnaire se trouvent entre le coléoptyle et les racicules (**Briggs, 1998**). Le scutellum, bordé sur son côté dorsal par l'axe embryonnaire et sur son côté ventral par l'albumen amylicé participe activement à la germination en sécrétant de l'acide gibbérellique (hormone végétale de croissance) et en synthétisant dès le début du processus de germination les enzymes nécessaires à la mobilisation des réserves accumulées dans l'albumen amylicé (**Ranki and Sopanen, 1984**). Enfin, l'embryon contient des composés responsables de la flaveur de la bière, en particulier des composés soufrés responsables de certaines flaveurs de la bière (diméthylsulfure) (**Anness and Bamforth, 1982; Yang et al., 1998, cité par Jean-Luc, R., 2011**).

**d. L'albumen :**

L'albumen est le tissu de réserve de l'orge, il contient des grains d'amidon, des protéines de réserve, des lipides et des polysaccharides pariétaux (**Tableau 04**). L'albumen est composé de la couche à aleurone et de l'albumen amylicé (**Fincher and Stone, 1986; Jadhav et al., 1998; Sullivan et al., 2010, cité par Jean-Luc, R., 2011**). C'est la composition particulièrement riche en  $\beta$ -glucanes des parois de l'albumen amylicé qui fait de l'orge la céréale la plus adaptée au maltage comparé au blé et au riz (**Tableau 05**).

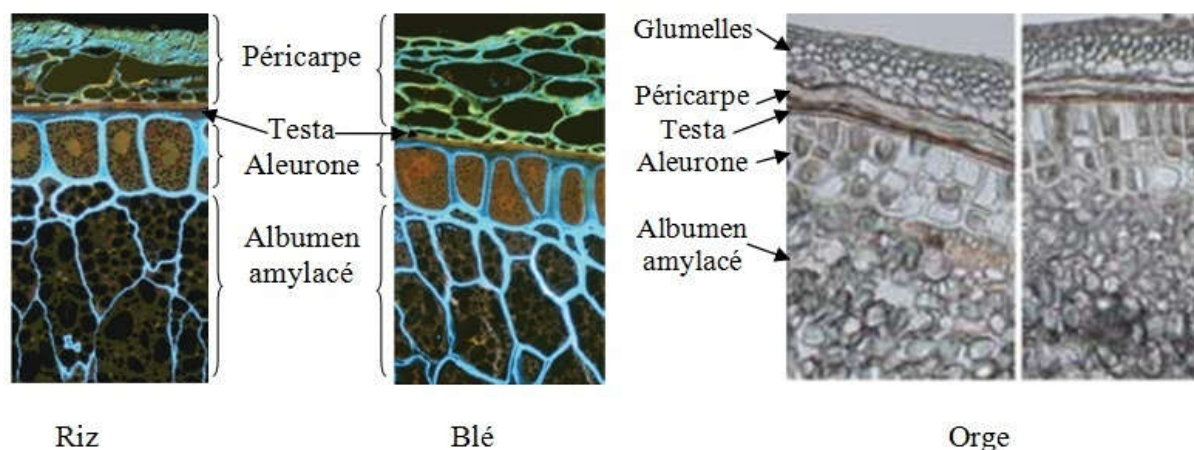
		Proportions	
Amidon	Amylose	52-78 %	25,0 %
	Amylopectine		75,0 %
Fibres		13-14 %	
Protéines		5-9 %	
Polysaccharides pariétaux	$\beta$ -glucanes	6-8 %	Albumen amylicé 70-75% / couche à aleurone 25 %
	Arabinoxylanes		Albumen amylicé 20 % / couche à aleurone 65-70 %

**Tableau 04 :** Composition de l'albumen d'orge (D'après Sullivan et al. 2010).

	Proportions		
	Orge	Blé	Riz
Cellulose	2 %	3-4 %	20-30 %
$\beta$ -glucanes	70-75 %	20-25 %	20-25 %
arabinoxylanes	20-25 %	70-75 %	25-30 %
glucomannanes	2-3 %	5-7 %	10-15 %

**Tableau 05 :** Composition des parois de l'albumen amylicé de l'orge, du blé et du riz (D'après Fincher et al., 1986).

La couche à aleurone est composée de trois à quatre assises cellulaires dans le grain d'orge contrairement au blé où elle n'est formée que d'une seule assise (**Figure 3**). Elle est riche en matière azotées et en réserves lipidiques. A maturité, la couche à aleurone entoure l'albumen amylicé et une petite partie de l'embryon. Ces cellules sont morphologiquement distinctes des cellules de l'albumen amylicé et constituent le seul tissu vivant à maturité (**Briggs, 1998**). Au cours de la germination, le scutellum et l'embryon sécrètent des gibbérellines qui induisent notamment la synthèse des enzymes hydrolytiques dans les cellules à aleurone. Au cours de la germination, ces enzymes sont diffusent dans les parois des cellules à aleurone avant de migrer dans l'albumen amylicé. Elles vont intervenir sur la dégradation des polysaccharides pariétaux, les protéines de réserve et l'amidon fournissant ainsi les éléments nutritifs nécessaires au développement de l'embryon (**Fincher, 1989, Jean-Luc, R, 2011**).



**Figure 03** : Coupe transversale de grains de riz, de blé et d'orge (D'après Kamal-Eldin et al., 2009). Observation par microscopie optique des différents tissus de grains de riz, de blé et d'orge (INRA Nantes).

L'albumen amylicé est constitué de cellules "mortes" qui contiennent des grains d'amidon entourés de protéines de réserve, l'ensemble formant une matrice continue. Les parois cellulaires sont principalement composées de  $\beta$ -glucanes et d'arabinoxylanes (polysaccharides pariétaux, Tableau 04) (Fincher and Stone, 1986; Fincher, 1989) qui sont hydrolysés au cours de la germination (Jean-Luc, R., 2011).

#### 2.4. Classification botanique de l'orge :

D'après Chadefaud et Emberger (1960), Prats (1960) et Feillet (2000), l'orge cultivée appartient à la classification suivante :

**Règne** : Plantae (Règne végétale)

**Embranchement** : Magnoliophyta (Angiosperme)

**Classe** : Liliopsida (Monocotylédones)

**Sous-classe** : Commelinidae

**Ordre** : Poales (Cyperales)

**Famille** : Poaceae (Graminées)

**Genre** : *Hordeum*

**Espèce** : *Hordeum vulgare* L

Rasmusson (1987), note que le genre *Hordeum* comprend des espèces diploïdes ( $2n=14$ ) dont les biotypes cultivés comme *Hordeum Vulgare*, *Hordeum Disiichum*, *Hordeum intermedium*, et sauvage comme *Hordeum spontaneum*, *Hordeum agriocrithon* et *Hordeum pusillum*. L'espèce tétraploïde ( $2n=28$ ) est constituée uniquement des biotypes sauvages comme

*Hordeum murinum*, *Hordeum bulbosum*, *Hordeum jubatum* et *Hordeum nodosum*. Le genre *Hordeum* est représenté en Algérie par les taxons spontanés suivants: *Hordeum bulbosum* L., *H. nodosum* L., *H. maritimum* With [ssp. *eu-maritimum* Hayek, ssp. *Gussoneanum* (Perl.) Asch et Gr. var. *annuum* (Lange) M. et W. et var. *incetum* M.], *H. murinum* [ssp. *Eumurinum* Briq, ssp. *leporinum* (Link) Asch. et Gr.], **(Quezel et Santa, 1962, cité par TAIBI, W., 2014)**.

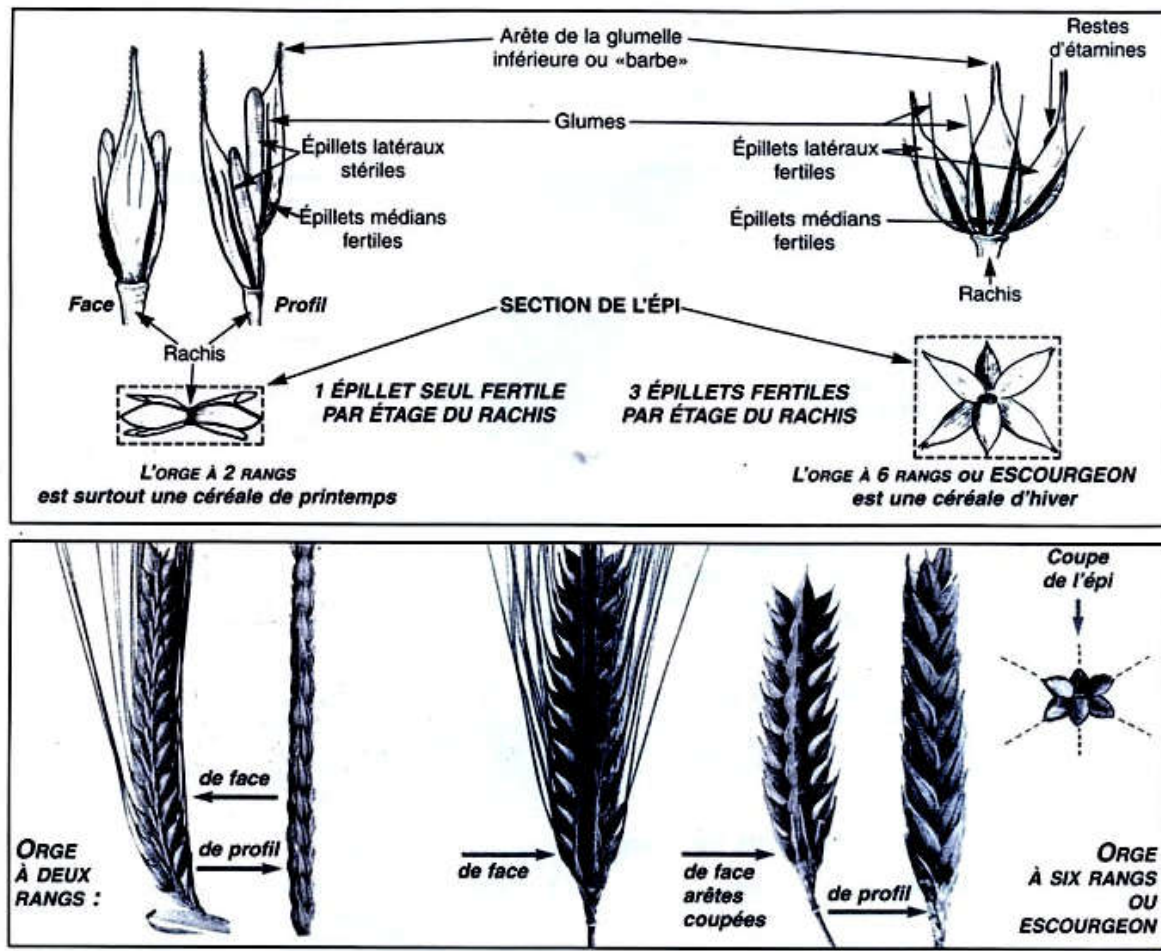
Sa classification est basée sur la fertilité des épillets latéraux, la densité de l'épi et la présence ou l'absence des barbes **(Rasmusson, 1992, cité par TAIBI, W., 2014)**.

**Liné (1755) 'in Grillo (1959)**, classent les orges selon le degré de fertilité des épillets et la compacité de l'épi en deux groupes **(Figure 04)**:

- le groupe des orges à six rangs dont les épillets médians et latéraux sont fertiles et qui se subdivise selon le degré de compacité de l'épi en:
  - ❖ *Hordeum hexastichum* L. (escourgeon) a un épi compact composé sur chaque axe du rachis de 3 épillets fertiles.
  - ❖ *Hordeum tétrastichum* L. a un épi lâche composé sur chaque axe du rachis de 2 épillets fertiles.
- le groupe des orges à 2 rangs dont les épillets médians seuls sont fertiles. Ce sont:
  - ❖ *Hordeum disiichum* L. a un épi aplati et lâche composé de deux rangées d'épillets fertiles, sur chaque axe du rachis, entouré de 4 épillets stériles.

Quant à **Soltner (2005), cité par TAIBI, W., (2014)**, il classe les orges selon leur milieu de culture en trois groupes qui sont:

- Les orges d'hiver dont le cycle de développement varie de 240 à 265 jours, s'implantent en automne. Ces orges ont besoin pour assurer leur montaison, de température vernalisante qui manifeste un degré plus au moins élevé de résistance au froid hivernal.
- Les orges de printemps dont le cycle de développement est très court (environ 120 à 150 jours), s'implantent au printemps. Ces orges n'ont aucun besoin de vernalisation pour assurer leur montaison.
- Les orges alternatives qui sont intermédiaires au plan tolérance au froid, entre les orges d'hiver et celles de printemps.



**Figure 04 :** Distinction entre l'orge à deux rangs et l'escourgeon (Simon et al., 1989, cité par BOUNGAB, K., 2013).

## 2.5. Exigences de la culture :

L'orge est la culture céréalière la plus rustique, elle est peu exigeante du point de vue climat, eau et sol ; cependant, sa rapidité de croissance entraîne la nécessité pour celle-ci de bénéficier de favorables conditions édapho-climatiques (BOUHANIA et ZEHRI, 2004).

### 2.5.1. Exigences climatiques :

Le zéro de végétation de l'orge est voisin de 0°C et présente une germination plus rapide par rapport au blé ; les basses températures causent des dégâts foliaires à -8°C et la mort du plant à -16°C pour les variétés les plus résistantes au froid.

La somme de température exigée est de l'ordre de 1600 à 1700°C pour l'orge de printemps dont le cycle de développement est de 110-120 jours ; pour l'orge d'hiver dont la durée du cycle est de 250 jours, celle-ci est de 1900 à 2000°C (BOUHANIA et ZEHRI, 2004).



### **2.5.2. Exigences édaphiques :**

L'orge n'est pas exigeant en sol comme le blé et tire profit même de terres minces et caillouteuses ; les sols calcaires légers lui conviennent bien mais les bons résultats sont obtenus dans les bonnes terres riches en humus et en éléments nutritifs (**BOUHANIA et ZEHRI, 2004**).

### **2.5.3. Exigences hydriques:**

D'après **MOULE (1980)**, l'orge (*Hordeum vulgare* L.) Nécessite en moyenne 450 à 500 mm d'eau pour produire 40 quintaux de grains et 3,5 tonnes de paille, ces besoins sont généralement satisfaits quand il s'agit d'une orge d'hiver. Dans le cas de l'orge de printemps, la pluviométrie printanière ne peut les satisfaire, ceci explique l'importance des réserves en eau du sol pour cette culture (**MOSTEFAOUI, S., 2011**).

### **2.5.4. Les exigences culturales:**

#### **2.5.4. a. Préparation du Sol :**

L'orge nécessite un sol bien préparé et ameubli sur une profondeur de 20 à 25 cm, une structure fine en surface pour permettre un semis régulier et peu profond (**BOUHANIA et ZEHRI, 2004**).

#### **2.5.4. b. Semis :**

Le semis peut commencer dès la fin d'octobre avec un écartement entre ligne de 18 à 20 cm et une profondeur de 3 à 4 cm. La dose de semis varie entre 140 à 160Kg/ha en fonction des paramètres climatiques, la grosseur des grains, la faculté germinative et la fertilité du sol (**BOUHANIA et ZEHRI, 2004**).

#### **2.5.4. c. La fertilisation :**

La fertilisation azoto-phosphorique est très importante dans les régions sahariennes face à des sols squelettiques, elle sera fonction des potentialités de la variété ; le fractionnement de l'azote est une nécessité du fait de la grande mobilité de cet élément. Les besoins en potassium sont peu importants, on estime que l'eau d'irrigation et le sol sont suffisamment pourvus. L'orge tolère très bien le calcium et se développe normalement en sols calcaires (**BOUHANIA et ZEHRI, 2004**).

#### 2.5.4. d. Entretien :

L'entretien de la culture se résume essentiellement en la lutte contre les principales mauvaises herbes ; les plus rencontrées sur d'orge soit la folle-avoine, le Phalaris, le ray-grass, le brome, ...etc. Mais aussi contre les maladies propres à cette culture (**BOUHANIA et ZEHRI, 2004**).

#### 2.6. Cycle de développement de l'orge :

L'orge (*Hordeum vulgare L.*) est une plante annuelle herbacée, effectuant son cycle évolutif en trois grandes périodes (période végétative, période reproductrice et période de maturation). Les mécanismes végétatifs et reproducteurs de blé dur et d'orge, de la germination à la maturation du grain, sont identiques (**Soltner, 2005, cité par KOUADRIA, R., 2019**).

Les différences les plus marquées concernent l'orge :

- Une organisation plus forte au tallage avec une paille souvent plus fragile ;
- Un cycle semis-maturité souvent plus court ;
- Une capacité de survie au froid n'atteignant généralement pas celle des blés ou des seigles (**Gallais et Bannerot, 1992**).

##### 2.6.1. La période végétative:

S'étend de la germination au tallage. Cette période, elle-même est subdivisée en trois stades principaux :

###### 2.6.1.1.Phase semis-levée :

Elle débute par le passage du grain de l'état de vie ralentie à l'état de vie active au cours de la germination qui se traduit par l'émergence de la racine et des racines séminales et celle de la coléoptile. Dès que la première feuille a percé la coléoptile, ce dernier s'arrête de croître et se dessèche. La réalisation de cette phase dépend des facteurs propres à la semence (faculté et énergie germinatives) et des facteurs extérieurs (température et humidité du sol) (**KOUADRIA, R., 2019**).

###### 2.6.1.2.Phase levée-début tallage :

La première feuille fonctionnelle s'allonge, puis la deuxième, jusqu'à la quatrième toutes en position alterne. Celles-ci, imbriquées les unes contre les autres, partant toutes une zone proche de la surface du sol appelée plateau de tallage, constituée par l'empilement d'un certain nombre d'entre-nœuds et reliées à la semence par le rhizome (**KOUADRIA, R., 2019**).

### 2.6.1.3. Phase début tallage- début montaison :

Elle se caractérise par l'entrée en croissance des bourgeons différenciés à l'aisselle de la première feuille, dont le bourgeon donnera le maître brin. Le nombre de talles émises par plante est en fonction de l'espèce, de la variété, du climat, de l'alimentation de la plante en azote et de la profondeur de semis (KOUADRIA, R., 2019).









### 2.6.2. La période reproductrice:

Le début de cette phase est marqué par une différenciation de l'ébauche d'épillet sur l'apex (stade A), ce stade marque la transformation du bourgeon végétatif en bourgeon floral. Le stade B est repéré par l'apparition de deux renflements latéraux qui apparaissent sur l'épillet, ce sont les ébauches des glumes. Dès le début de la montaison, les pièces florales se différencient : glumelles (inférieure et supérieure), organes sexuels (étamines et stigmate); et en parallèle, la tige et l'inflorescence s'allongent. Les apex des talles différencient des ébauches d'épillets puis des pièces florales et montent : c'est le tallage épi. Au stade gonflement, l'inflorescence monte en grossissement dans les gaines des différentes feuilles. Ainsi, la gaine de la dernière feuille s'allonge et gonfle. Peu après, l'inflorescence sort de la gaine de la dernière feuille : c'est le stade épiaison. La fécondation et l'anthèse suivent de quelques jours l'épiaison (KOUADRIA, R., 2019).

### 2.6.3. La période de maturation :

Au cours de cette dernière période, l'embryon se développe et l'albumen se charge de substances de réserves, entraînant une augmentation du volume et du poids des grains. La phase se termine par le stade laiteux (le grain s'écrase facilement en laissant apparaître un liquide blanchâtre). Ensuite, le poids frais des grains continue à augmenter alors que celui des tiges et des feuilles diminue. La phase se termine par le stade pâteux. Le grain à ce stade s'écrase en formant une pâte. Enfin, le grain devient dur et de couleur jaunâtre. C'est le stade de la maturation physiologique (KOUADRIA, R., 2019).

Sur le **tableau 06**, les différents stades de développement de l'orge sont indiqués.

Stades		Echelle de Feekes	Caractéristiques
	Levée	1	1 <sup>er</sup> feuille perce le coléoptile 3 feuilles
	Début tallage	2	Formation de la 1 <sup>er</sup> talle
	Plain tallage	3	2 à 3 talles
	Fin tallage	4	
	Epi à 1 cm	5	Sommet de l'épi distance 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 graine 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

**Tableau 06** : différents stades de développements de l'orge (*Hordeum vulgare L.*) (L.T.C.F, 1983, in RAHAL, B.H., 2006).

## 2.7. Les constituants biochimiques de l'orge :

Les glucides représentent environ 80% de la matière sèche des graines et sont constitués essentiellement d'amidon localisé au niveau du caryopse. Il constitue la principale source d'énergie dans les grains d'orge. La cellulose est principalement concentrée dans les glumelles (50 à 60%), les enveloppes du grain et les parois cellulaires de la couche d'aleurone. Elle représente 5 à 8% en moyenne de la matière sèche. L'orge a une teneur en matières grasses moins élevée que celle du maïs, du sorgho ou de l'avoine. Les teneurs moyennes observées varient de 1,5 à 2,5%. Sa teneur en acide linoléique est nettement inférieure à celle du maïs et à celle d'autres céréales. Un apport complémentaire de cet acide gras essentiel dans les aliments à base d'orge est parfois recommandé.

L'orge demeure une céréale relativement pauvre en protéines par rapport au blé ou au triticale mais sa teneur reste supérieure à celle du maïs. La teneur en protéines est influencée par la variété, et son mode de culture. Les protéines de l'orge présentent un profil en acides aminés mieux adapté aux besoins des animaux que celui du maïs ou du blé. Les teneurs en calcium et en sodium sont légèrement supérieures à celles du maïs. L'orge demeure une céréale relativement pauvre en ces éléments (**Benabdeljelil, K., 1999**). L'orge est aussi une source de phosphore, de magnésium, de fer, de zinc, de manganèse, de cuivre et de sélénium (**ALAYAT, A., 2015**).

Les constituants biochimiques de l'orge en % de matière sèche est donnée dans le **tableau 07**. On retrouve également beaucoup de molécules anti oxydantes dans l'orge ; parmi lesquelles on compte :

### - La vitamine E :

L'orge contient différentes variantes de la vitamine E (Tocotriénols, tocophérols). Chez l'humain, plusieurs études ont indiqué que les effets des Tocotriénols ont la capacité d'inhiber la prolifération de cellules cancéreuses, principalement celles du sein. Des études chez l'animale ont observé un effet neuroprotecteur même en très petite quantité, et cette molécule est vue comme prometteuse pour la protection des cellules cérébrales humaines. Enfin des études chez l'humain et l'animale ont démontré un effet hypocholestérolémiant (**ALAYAT, A., 2015**).

- **Les composées phénoliques (flavnols) :**

L'orge contient plusieurs composés phénoliques. Parmi ces divers composés, les flavnols (appartenant à la famille des flavonoïdes) seraient ceux qui se trouvent en plus grande proportion dans les graines d'orge, pouvant atteindre une quantité totale d'environ 225 µg/g selon la variété de la graine. Une étude *in vitro* a observé des effets bénéfiques en exposant des cellules cancéreuses à un type de flavnol extrait du son d'orge, et les auteurs de l'étude voient en cette céréale un intérêt potentiel pour contribuer à la prévention du cancer (ALAYAT, A., 2015).

Constituants biochimiques	Teneur en % du poids sec
<b>Glucides</b>	<b>78-85</b>
- 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
<b>Lipides</b>	<b>2-3</b>
<b>Protéines</b>	<b>8-11</b>
- Albumines	0,5
- Globulines	3
- Hordéines	3-4
- Glutélines	3-4
- Acides aminés et peptides	0,5
<b>Acides nucléiques</b>	<b>0,2-0,3</b>
<b>Sels minéraux</b>	<b>2</b>
<b>Autres dont lignine ...</b>	<b>5-6</b>

**Tableau 07** : constituants biochimiques de l'orge en % de matière sèche (GUIGA, W., 2006).

## 2.8. Importance et utilisation de l'orge :

A l'échelle mondiale et par ordre d'importance, l'orge est utilisée en alimentation du bétail, pour le maltage (notamment en brasserie) et en alimentation humaine. Dans les régions tropicales et subtropicales, c'est surtout pour l'alimentation humaine qu'elle est produite. En Ethiopie et en Erythrée, la plus grande partie de l'orge en grains sert à confectionner un pain local qui ressemble à une crêpe ; mais on en fait aussi bien des bouillies et des soupes que des boissons alcoolisées (**Ceccarelli et Grando, 2006**).

De nos jours, et particulièrement dans les pays de l'Europe de l'Est, la farine d'orge est généralement mélangée à celle du blé et d'autres céréales pour la fabrication de galettes et de pain. En Amérique du Nord et en Europe de l'Ouest, 20-25 % seulement de la production est utilisée directement pour la préparation de farine destinée à la confection de pain et d'autres mets pour l'alimentation humaine. Environ 45-50 % de la production annuelle d'orge est utilisée pour l'alimentation animale, et comme semences pour la production de l'année suivante. Près de 30 % de la production est utilisée pour la production du malt pour la fabrication de la bière et d'autres boissons alcoolisées (**Ceccarelli et Grando, 1996**).

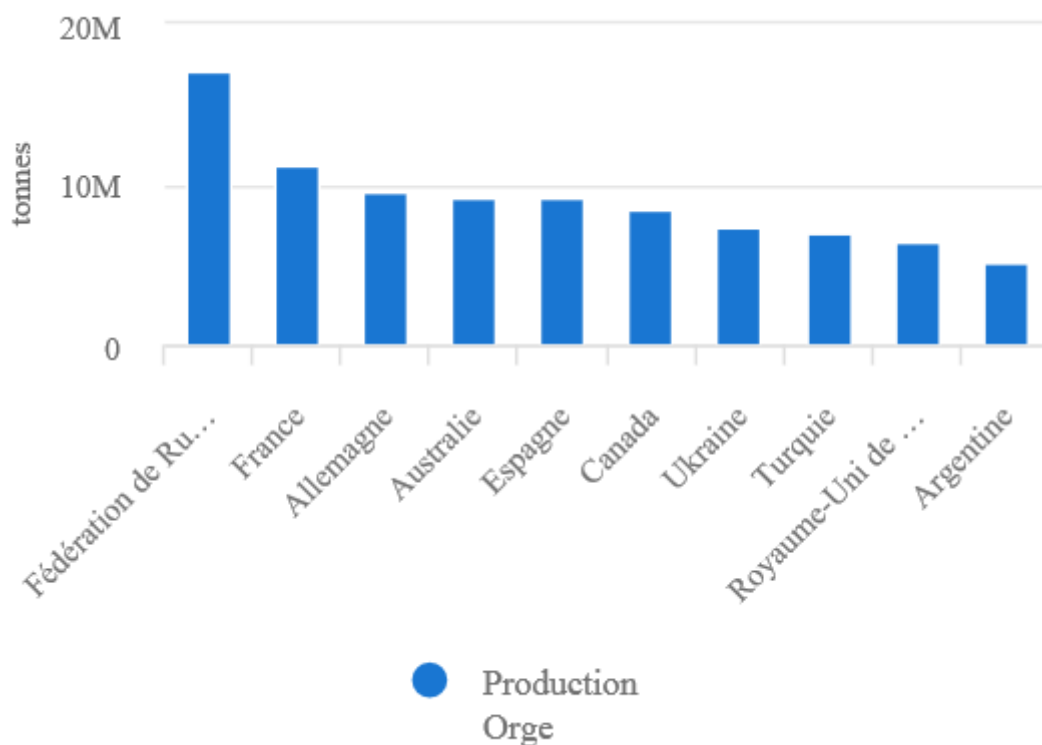
En Algérie, la culture d'orge était très importante car l'orge était destinée à l'autoconsommation humaine et servait de complément fourrager pour les troupeaux dans les régions steppiques. Actuellement, l'orge est utilisée dans l'alimentation humaine selon les régions sous formes de galette, de couscous et de soupe. C'est une espèce fourragère importante par sa production en vert, en foin (en association avec d'autres espèces), en ensilage et par son grain et sa paille. Dans toutes les régions, du nord au sud, elle reste l'une des plus importantes sinon la plus importante ressource fourragère (**BOUNGAB, K., 2013**).

L'orge contient huit acides aminés essentiels (tryptophane, lysine, méthionine, phénylalanine, thréonine, valine, leucine et isoleucine). Ses principaux acides gras sont : l'acide linoléique, l'acide palmitique, l'acide oléique, et l'acide linoléique (**BOUNGAB, K., 2013**).

Selon (**Arbouche et al., 2008, in BOUNGAB, K., 2013**). Les variétés d'orge européennes importées ont des valeurs nutritives moins importantes que celles des variétés locales. Leur teneur moyenne en matières azotées totales est de 13,3% de MS avec une valeur maximale pour la variété Tichedrett de 15,5% de MS. Le taux de cellulose brute est de 7,8% de MS et celui de la lignine est le double de celui des orges européennes.

## 2.9. La production mondiale d'orge :

L'orge constitue la quatrième céréale cultivée au niveau mondial après le maïs, le blé et le riz (FAO-STAT, 2019). Les principaux pays producteurs d'orge sont indiqués en (Figure 05).



**Figure 05** : Les dix principaux producteurs d'orge pour 2018. Les données de (FAOSTAT, 2018)

On distingue 3 producteurs majeurs qui sont : La Russie, l'Union Européenne et l'Australie. (FAOSTAT, 2018).



## Chapitre 2 : Aluminium

## 1. Généralités sur L'aluminium :

L'Aluminium (AL) (du latin *alumen*, qui signifie « léger ») est le troisième élément le plus abondant de la croûte terrestre après l'oxygène et le silicium. Il se trouve généralement dans le sol sous forme de silicate d'aluminium ( $Al_2SiO_5$ ) ou d'oxyde d'aluminium ( $Al_2O_3$ ) (**Bojórquez et al., 2017**). L'aluminium est l'élément chimique de symbole Al, de numéro atomique 13 dans le tableau périodique des éléments. Il appartient à la famille des métaux pauvres (Bloc P) comme le gallium et l'indium et qui n'existe que très peu à l'état natif dans le milieu naturel. Il représente ainsi (8,3% poids) de la croûte terrestre (**EARNSHAW et GREENWOOD, 1997**).

L'aluminium est un métal très utilisé pour des applications diverses et variées dans l'industrie du bâtiment et des transports, dans l'agroalimentaire, l'emballage, la fabrication d'ustensiles de cuisine, en pharmacie, chirurgie, en cosmétologie ainsi que dans le traitement des eaux d'alimentation. Il est suspecté, depuis les années 1970, avoir un impact sur la survenue de la maladie d'Alzheimer. En 2003, l'InVS rend donc une synthèse des données épidémiologiques sur les risques sanitaires de l'aluminium (**MAERTENS, W.S., 2015**).

## 2. Propriétés physico-chimique de l'aluminium :

L'aluminium a été découvert en 1808 par le chimiste anglais Davy. Il fallut attendre 1827 pour qu'un autre chimiste, Friedrich Wöhler, isole ce métal et mette en évidence ses propriétés physiques et chimiques.

A l'état libre, l'aluminium se présente sous la forme  $Al^{3+}$ . Avec un numéro atomique de 13, il constitue le treizième élément de la classification de Mendeleiev. Sa masse atomique est de 26,98 g. mol<sup>-1</sup> et sa densité de 2,7 g.cm<sup>-3</sup>. C'est un métal qui a un point de fusion à 660°C et un point d'ébullition à 2467°C. Il possède une couleur gris-argenté et un aspect brillant.

Concernant ses propriétés physiques, l'aluminium est un métal léger (trois fois plus que l'acier), un bon conducteur électrique et il possède une grande malléabilité et ductilité. Il est également très résistant à la traction ainsi qu'à la corrosion de l'air et de l'eau (ceci est lié à la couche d'alumine qui se forme à sa surface) (**OULAD LMAROUDI., 2016**).

L'aluminium se trouve sous différentes formes organiques et inorganiques, les sels inorganiques de l'aluminium (à l'exception du silicate) sont généralement solubles à très solubles.

Les sels d'acides organiques de faible poids moléculaire conservent une certaine solubilité, tout comme les sels anioniques (exemple aluminate de potassium et sodium) (TAÏR, K., 2017).

Les hauts poids moléculaires (par exemple les composés organiques) et le pH limitent la solubilité de l'aluminium. Il est généralement insoluble aux pH neutres (6-8), et peut se solubiliser dans des conditions acides (pH<6) ou basiques (pH>8). La présence de complexes ligands favorisent cette solubilité (TAÏR, K., 2017).

En règle générale, les composés chloro-aluminium sont instables en présence de source d'oxygène telle que l'eau et s'hydrolysent plus ou moins lentement jusqu'à la formation de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  et ses agrégats aux structures diverses et mal connues, avec une production de chlorure d'hydrogène (HCl). La force motrice thermodynamique de cette réaction est la formation de la liaison Al-O, l'une des plus fortes parmi celles connues. Cette propriété permet, le plus souvent, d'expliquer les différentes réactivités des dérivés aluminiques (TAÏR, K., 2017).

La réactivité de plusieurs composés chloro-aluminium permet de comprendre leurs potentiels irritants variables

- ❖ la forme anhydre  $\text{AlCl}_3$  est un composé très sensible à l'eau avec laquelle il réagit exothermiquement aboutissant à la production de HCl (produit de la réaction entre  $\text{H}_2\text{O}$  et  $\text{AlCl}_3$ ). L'exotherme associée à la production d'HCl rend l' $\text{AlCl}_3$  très corrosif ;
- ❖ la forme hexahydrate  $-\text{AlCl}_3$  est moins corrosive. En milieu aqueux, ce composé s'ionise en donnant  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{(3+)}$  et trois ions chlorure. Le cation  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{(3+)}$  est un acide faible, ce qui le rend corrosif, car en milieu physiologique (pH neutre), il donne une forme stable  $\text{Al}(\text{OH})_3$  en libérant du HCl ;
- ❖ les formes chlorohydrates d'aluminium dont la formule générale est du type  $\text{Al}_x(\text{OH})_y(\text{Cl})_z$  sont des composés déjà partiellement hydrolysés, ce qui explique leur caractère moins corrosif. De plus, ces formes ont tendance à s'agréger (agrégats polynucléaires) ce qui diminue leur réactivité et l'exothermie de la réaction. Elles finissent cependant, par s'hydrolyser dans l'eau avec production d'HCl.

Les principales propriétés physico-chimiques des trois sels inorganiques d'aluminium (Chlorure, Nitrate et sulfate) sont reprises dans le (Tableau 08).

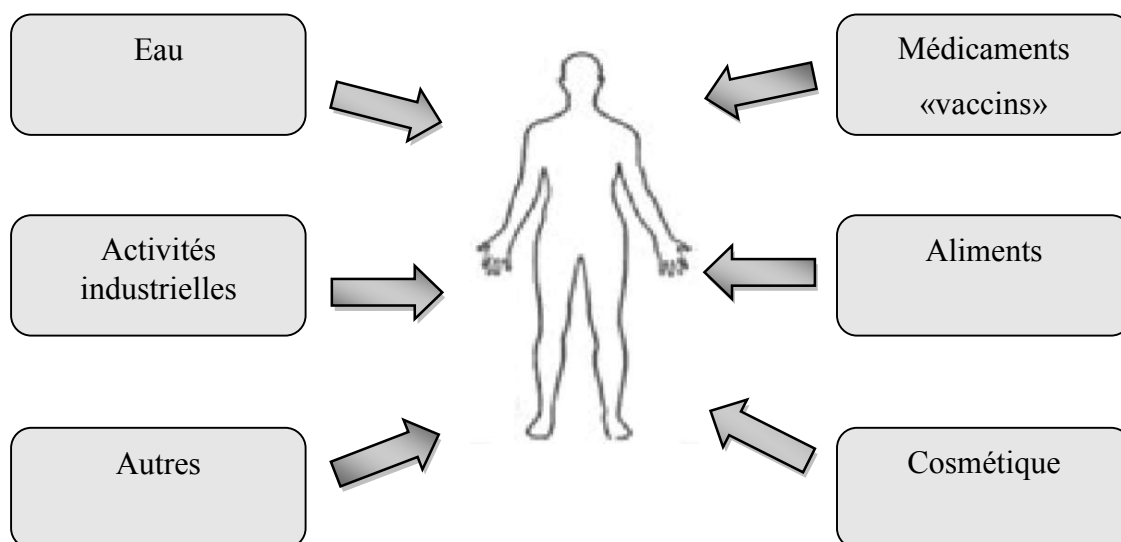
Propriety	Chlorure d'aluminium	Nitrate d'aluminium	Sulfate d'aluminium « Alun »
Formule chimique	$AlCl_3$	$Al(NO_3)_3$	$Al_2(SO_4)_3$
Masse moléculaire	133,34	213,00	342,14
Couleur	Blanc à l'état pur, habituellement gris ou jaune verdâtre	Incolore	Blanc, lustré
État physique	Blanc, hexagonal, déliquescent ou plaquettes sensibles à l'humidité	Cristaux Orthorhombiques	Cristaux, morceaux, granules ou poudre
Densité (g/ml)	2,48		1,61
Point de fusion (°C)	194 à 527 kPa	732	Se décompose à 770 °C
Point d'ébullition (°C)	182,7 (1,00 × 105 Pa ou 752 mm Hg; température de sublimation)	Se décompose à 135 °C	Pas de point d'ébullition
Solubilité dans l'eau (g/100 ml)	69,86 (15 °C) (réaction explosive au contact de l'eau)	63,7 (25 °C)	36,4 (20 °C)
Solubilité dans d'autres solvants	Soluble dans le benzène, le tétrachlorure de carbone, le chloroforme	Très soluble dans l'alcool; légèrement soluble dans l'acétone; presque insoluble dans l'acétate d'éthyle, la pyridine	Insoluble dans l'éthanol
Ph		Solution aqueuse acide	
Pression de vapeur (Pa)	100 (20 °C)	Non Déterminée	0 (20 °C) Pas de pression de vapeur

**Tableau 08 :** Propriétés physico-chimiques du chlorure d'aluminium, du nitrate d'aluminium et du sulfate d'aluminium (TAÏR, K., 2017).

### 3. Sources d'exposition de l'aluminium :

L'aluminium n'a pas d'origine endogène chez l'homme ; il est apporté à l'organisme par l'air, les locaux professionnels, l'alimentation, l'eau des boissons ou certains médicaments comme

par exemple les antiacides, certains produits cosmétiques (déodorants ou antitranspirants majoritairement) et les adjuvants vaccinaux aluminiques (**CHARRIERE, M. A., 2018**). A l'état naturel, il est toujours retrouvé combiné à d'autres éléments sous forme d'oxydes (par exemple l'alumine :  $Al_2O_3$ ), hydroxydes, silicates, sulfates, nitrates ou encore chlorures. L'aluminium métal est obtenu à partir d'un minerai appelé bauxite (**BABIN, J., 2016**).



**Figure 06 :** Sources d'exposition humaine à l'Aluminium (**Shaw et Tomljenovic, 2013**).

### 3.1. Dans l'alimentation :

Etant présent dans notre environnement, l'aluminium se retrouve naturellement dans notre alimentation, en très faibles quantités. Pratiquement toutes les denrées alimentaires contiennent naturellement de l'aluminium même si certaines en contiennent plus que d'autres. C'est notamment le cas du pain, du basilic, du cacao, du thé et des légumes, en particulier les épinards. Mais les aliments peuvent contenir des quantités d'aluminium plus importantes en raison de l'ajout d'additifs alimentaires ou de la contamination par les emballages et ustensiles de cuisine contenant ce métal (**Maherou et al., 2014**).

L'aluminium est très utilisé dans les ustensiles car c'est un élément léger et un très bon conducteur de chaleur et d'électricité. Mais, la chaleur facilitant la libération du métal, lors de la cuisson, l'aluminium peut migrer vers les aliments et ainsi les contaminer, d'autant plus s'il s'agit d'aliments acides. En effet, en milieu acide, l'aluminium est présent sous une forme soluble, ce qui facilite sa migration. Ainsi, à titre d'exemple, 100 g de tomates peuvent renfermer 6,5 mg d'aluminium après avoir été cuits et conservés pendant toute une nuit dans

un récipient en aluminium. Après cuisson, 100 g de rhubarbe et d'abricots peuvent en contenir respectivement 4 mg et 7 mg (Maherou et al., 2014). Cependant, certaines études ont permis d'établir une liste des aliments qui en contiennent plus. Comme il est indiqué dans le tableau ci-dessous (Arnich et al., 2012 ; Biego et al., 1998 ; Leblanc et al., 2004).

Groupe alimentaire	Concentration moyenne en aluminium (mg / kg de poids frais)
Pain, biscottes	4,06
Biscuits	5,29
Pâtisserie	1,40
Lait	0,19
OEufs et dérivés	0,10
Beurre	0,08
Huiles	0,05
Viandes	0,21
Volailles et gibiers	0,26
Poissons	0,51
Crustacés et mollusques	17,1
Légumes (à l'exclusion des pommes de terre)	3,22
Fruits	0,41
Fruits secs et graines oléagineuses	4,10
Glaces	3,91
Chocolat	3,69
Pizzas, quiches etc...	2,24

**Tableau 09** : Concentration moyenne en aluminium dans quelques aliments (mg / kg de poids frais) (Leblanc et al., 2004).

### 3.2. Les additifs alimentaires :

L'aluminium ayant de nombreuses propriétés, les industriels de l'agroalimentaire l'utilisent comme additifs alimentaires (ASEF, 2017), (Colorants, anticoagulants, raffermissants ou encore levants), rend l'aluminium omniprésent à des doses anti-physiologiques dans la plupart des aliments et augmentent ainsi le taux d'aluminium dans le sang de façon spectaculaire.

- desserts et boissons,
- fruits confits,
- produits laitiers,
- lait maternisé industriel,
- préparations à base de blanc d'œuf,
- grains et les produits céréaliers,
- sel blanc de table traité au silicate d'aluminium,

- agents de blanchiment pour traiter la farine,
- certains fromages fondus contenant de l'aluminium comme émulsifiant (fromages en boîte) etc...(Cabernet, 2013).

Ces additifs sont tous homologués autorisés par l'Union européenne, parmi les plus courants à base d'aluminium sont entre autres par exemple des Colorants (VIRGINIE, B., 2010) :

Dérivés de l'aluminium	Catégorie	Aliments dans lesquels il peut être utilisé (sous condition)
<b>E 173</b> Aluminium métallique	Colorant alimentaire	Décorations de gâteaux et préparations de colorant alimentaire (sous forme de substrats d'aluminium.
<b>E 520</b> Sulfate d'aluminium	Agent affermissant	blanc d'œuf, fruits et légumes confits, cristallisés et glacés.
<b>E 521</b> Sulfate d'aluminium et de sodium	Agent affermissant	blanc d'œuf, fruits et légumes confits, cristallisés et glacés.
<b>E 522</b> Sulfate d'aluminium potassique	Agent affermissant	blanc d'œuf, fruits et légumes confits, cristallisés et glacés.
<b>E 523</b> Sulfate d'aluminium et d'ammonium	Correcteur du PH	blanc d'œuf, fruits et légumes confits, cristallisés et glacés.
<b>E 554</b> Silicate d'aluminium et de sodium  <b>E 555</b> Silicate d'aluminium et de potassium (ou Bentonite)  <b>E 556</b> Silicate d'aluminium et de calcium  <b>E 559</b> Silicate d'aluminium (ou Kaolin)	Agents Antiagglomérants	-Denrées alimentaires séchées en poudre comme le lait, le sel, le sucre ou le cacao... - Denrées alimentaires en comprimés, en pastilles et en dragées ; -Fromage à pâte dure, à pâte demi-dure et fondu, râpé ou en tranches ; -Chewing-gum ; -Riz ; -Saucisses et saucissons (traitement en surface uniquement) ; -Assaisonnements 30 g/Kg ; -Confiseries à l'exclusion du chocolat (traitement en surface uniquement) ; -Matières grasses tartinables pour enduire les moules à pâtisserie ;
<b>E 541</b> Phosphate d'aluminium et de sodium	Sel émulsionnant	Produits de boulangerie fine ( <i>scones</i> et génoiserie uniquement), levure.

**Tableau 10** : La liste des codes E... à base d'aluminium peuplant nos étiquettes, autorisés par l'Union européenne, et les aliments dans lesquels on les trouve (VIRGINIE, B., 2010).

### 3.3.L'eau du robinet :

Si l'ingestion d'aliments représente 95% des apports quotidiens d'aluminium, le reste est en partie apporté par l'eau du robinet (ASEF, 2017). La présence d'aluminium dans l'eau de boisson peut s'expliquer par trois origines différentes. Tout d'abord, l'aluminium est présent naturellement dans l'eau, il peut être retrouvé sous trois formes : insoluble, colloïdale et soluble. Ensuite, la présence d'aluminium peut être due aux traitements des eaux. En effet, du sulfate d'aluminium ou des sels d'aluminium pré-polymérisés peuvent être utilisés comme réactifs pour la coagulation des eaux. Enfin, dans certains réseaux d'immeubles ou en milieu hospitalier, l'aluminium est utilisé pour combattre la formation de tartre lors de la production d'eau chaude (BABIN, J., 2016).

Lors du traitement des eaux, des agents flocculants à base de sels d'aluminium sont ajoutés pour éliminer les particules organiques dans l'eau et pour rendre l'eau plus claire et limpide. L'aluminium se lie aux particules organiques en suspension et forme des flocons qui s'agglomèrent et se déposent sous l'effet de la gravité. La grande majorité des sels d'aluminium utilisés se retrouvent dans les boues ou terres de décantation, mais il peut en rester dans l'eau du robinet. Le sulfate d'aluminium  $Al_2(SO_4)_3$  et le chlorure d'aluminium  $AlCl_3$  sont les flocculants les plus répandus parce qu'ils sont efficaces, relativement peu coûteux et que l'on peut se les procurer facilement. Cependant, toutes les communes n'utilisent pas ce type de traitement. Par exemple, la ville de Paris a substitué l'aluminium par du chlorure ferrique (ASEF, 2017).

La valeur réglementaire de la concentration de l'aluminium dans l'eau est fixée à 0,2 mg/l par la DCE (Directive Cadre Eau) et l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé), mais l'eau de certaines communes dépasse parfois cette limite (ASEF, 2017).

### 3.4.Dans les cosmétiques :

Certains sels d'aluminium sont largement utilisés dans les cosmétiques ; On est retrouvé également dans :

- les déodorants du fait de ses propriétés anti-transpirantes, le plus souvent sous la forme de chlorhydrate d'Aluminium.
- les produits dentaires ou les soins pour visage ou le corps du fait de ses propriétés abrasives.
- les crèmes solaires (ASEF, 2017).



Un nombre très limité d'études ont montré que la peau est une barrière efficace à l'absorption transdermique d'aluminium (Pineau et al., 2012). Selon (Flarend, R., et al., 2001), Seulement 0,012% de l'aluminium appliqué au niveau des aisselles a été absorbé par la peau. À ce rythme, environ 4 µg de l'aluminium est absorbé par une seule utilisation de chlorhydrate d'Aluminium sur les deux aisselles. Cela représente environ 2,5% de l'aluminium généralement absorbé par l'intestin des aliments au cours de la même période. Par conséquent, une utilisation unique de chlorhydrate d'Aluminium appliquée sur la peau n'est pas une contribution significative à la charge corporelle de l'aluminium. D'ailleurs, dans un rapport d'octobre 2011, l'ANSM (Agence nationale de sécurité du médicament) a recommandé de ne pas utiliser les produits cosmétiques contenant de l'aluminium sur peau lésée (ASEF, 2017).

Types de produits cosmétiques	Sels l'aluminium	Usages
Déodorants	Chlorhydrate d'aluminium, Aluminium capryloyl glycol, Sulfate d'aluminium et de potassium, Sesquichlorohydrate d'aluminium + aluminium capryloyl glycol	Antitranspirant
	Hydroxychlorure d'aluminium	Déodorant
Produits de rasage	Sulfate d'aluminium et de potassium	Agent apaisant
Crèmes, émulsions, lotions, gels et huiles pour la peau	Aluminium starchoctenylsuccinate, silicate d'aluminium	Agent de viscosité
	Sulfate d'aluminium	Astringent
Masques de beauté	Aluminium starchoctenylsuccinate, silicate d'aluminium	Absorbant
Produits de maquillage et de démaquillage des yeux et du visage	silicate d'aluminium et de magnésium	épaississant
Produits de maquillage du visage	Oxyde d'aluminium	Agent de support des laques de colorants
		Hydratant
Produits de soins pour le visage et le corps	Stéarates d'aluminium	épaississant
	Silicate d'aluminium	abrasif
		absorbant

		hydratant
Produits solaires	Hydroxyde d'aluminium	Agent d'enrobage du dioxyde de titane
Dentifrices	Oxyde d'aluminium	abrasif
	Fluorure d'aluminium	-
Colorants	Hydroxyde d'aluminium, Oxyde d'aluminium, Silicate d'aluminium	-

**Tableau 11** : Les différents sels d'aluminium et leurs rôles dans les produits cosmétiques (INERIS, 2014).

### 3.5.Médicaments :

Certains médicaments en vente libre telles que les antiacides et l'aspirine contiennent suffisamment d'aluminium pour augmenter la dose quotidienne de manière significative. Beaucoup d'antiacides (par exemple Maalox) sont composés d'un mélange d'Hydroxyde d'aluminium  $\text{Al}(\text{OH})_3$  et d'autres hydroxydes, tels que le magnésium. Les comprimés supplémentaires forts de Maalox, par exemple, contiennent 400 mg d' $\text{Al}(\text{OH})_3$  et 400 mg d'Hydroxyde de magnésium  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ . La dose recommandée pour le soulagement du malaise gastrique est jusqu'à huit comprimés par jour ; c'est-à-dire, une dose en aluminium de 3.2 g d' $\text{Al}(\text{OH})_3$  ou de 1.1 g, qui est une augmentation 30 fois supérieure à l'exposition moyenne contenant de la nourriture et de l'eau potable seulement. Les patients présentant une insuffisance rénale prennent souvent de grandes quantités d'aluminium contenant dans les antiacides au phosphate. Le phosphate d'aluminium ( $\text{AlPO}_4$ ) est insoluble et facilite l'excrétion du phosphate par les fèces (DOUICHENE, 2016).

L'utilisation des solutions intraveineuses : le gluconate de calcium et le phosphate du potassium contiennent environ 5.1 mg d'aluminium/g et 17 mg/g, respectivement.

Les personnes dialysées peuvent être exposés à de grandes quantités d'aluminium par l'intermédiaire de leur liquide de dialyse. Cette exposition a été responsable des épisodes notables de neurotoxicités (DOUICHENE, 2016).

L'aluminium sous forme d'hydroxyde ou de phosphate a été le premier adjuvant breveté dans les années 1920. Il est aujourd'hui le seul adjuvant autorisé aux États-Unis et le seul inscrit à la Pharmacopée européenne depuis la suppression du phosphate de calcium, historiquement utilisé en France jusque dans les années 1990. L'utilisation des adjuvants dans les vaccins permet d'augmenter l'efficacité de la vaccination : augmentation de la réponse immunitaire évaluée par le titre sérique des anticorps produits, augmentation du taux de séroconversion

dans des populations qui répondent mal en raison par exemple de l'âge, d'une maladie ou d'un traitement (Grangeot-Keros, 2016).

Des travaux expérimentaux sur le devenir dans l'organisme de l'aluminium ingéré ou inoculé ont abouti à fixer la limite d'aluminium métal par dose vaccinale à 0,85 mg. La dose d'aluminium présente dans les vaccins du calendrier vaccinal en France est toujours inférieure à ce seuil (Grangeot-Keros, 2016).

Dans le Tableau 12 sont détaillés les différents sels d'aluminium utilisés dans les vaccins

Formule chimique	Nom	Vaccins
$\text{Al(OH)}_3$	Hydroxyde d'aluminium	Diphtérie, Tétanos, Coqueluche, HBV, HAV
$\text{AlPO}_4$	Phosphate d'aluminium	
$\text{AlH}_2\text{O}_8\text{PS}$	Sulfate d'hydroxyphosphate d'aluminium	HPV

**Tableau 12** : sels d'aluminium utilisés dans les vaccins (Christelle, 2014).

#### 4. Comportement de l'aluminium dans l'environnement :

##### 4.1.L'aluminium dans le sol :

L'aluminium présent dans les sols n'est jamais à l'état métallique et les proportions dans lesquelles on le trouve varie énormément d'un sol à l'autre (de 3 à 60 %). L'origine de l'aluminium dans la lithosphère peut être attribuée à une décomposition mécanique de fragments rocheux et à l'action combinée d'argile et de substances organiques qui mobiliseraient le cation aluminique. Le dioxyde de carbone et les acides organiques sont généralement considérés comme des agents ayant un rôle important dans la réalisation de ce processus (CUNAT, L., 1999). L'aluminium se trouve à l'état naturel dans les sols sous forme de silicates d'aluminium ou d'oxyde d'aluminium :

- les aluminosilicates sont, soit des minéraux primaires (feldspaths, feldspathoïdes, micas, pyroxènes, amphiboles), soit des minéraux d'altérations (minéraux d'argile...). La forme la plus pure des aluminosilicates est le kaolin.
- l'oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) est, soit anhydre (alumine), soit hydraté. La forme anhydre pure constitue le corindon et la forme impure l'émeri, que l'on retrouve dans les pierres précieuses (rubis, topaze, saphir, émeraude ...) (CUNAT, L., 1999).

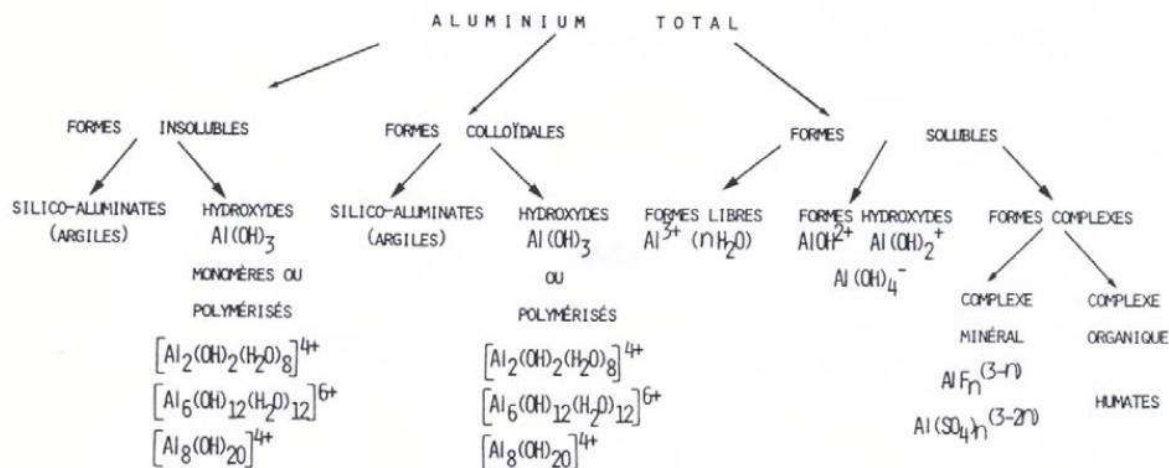
Le minerai d'aluminium le plus exploité est la bauxite, c'est un mélange de plusieurs formes d'oxydes hydratés dont des oxydes de fer et de silicium en plus de ceux de l'aluminium. L'aluminium combiné est l'élément majoritaire du sol qui est le moins soluble. Sa solubilité est influencée par la présence d'autres éléments dont principalement les ions hydrogène et phosphate. Les connaissances sur la spéciation de l'aluminium dans les sols sont peu nombreuses. Il est connu que seuls les sols très acides (de  $\text{PH} \leq 5$ ) peuvent redissoudre des quantités significatives d'hydroxyde d'aluminium. L'aluminium soluble est principalement sous forme d'ions oxyaluminium,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{H}^+$ , un peu sous forme cationique  $\text{Al}^{3+}$  et sous forme colloïdale (CUNAT, L., 1999).

#### 4.2.L'aluminium dans l'air :

L'air pur contient environ  $100 \text{ ng /m}^3$  d'aluminium, notre exposition à l'aluminium par la respiration normale est d'environ  $1,4 \mu\text{g}$  par jour. Il s'agit essentiellement d'une exposition la plus faible possible à l'aluminium provenant respiré. Cette valeur pourrait facilement être multipliée par mille pour atteindre  $1,4 \text{ mg}$  par jour dans de nombreuses régions industrialisées. L'exposition à l'aluminium par la respiration peut également être fortement influencé par des activités spécifiques, notamment l'exposition industrielle / sur le lieu de travail et l'exposition habituelle comme la cigarette et le cannabis et l'usage de cocaïne et d'héroïne (Exley, 2013).

#### 4.3.L'aluminium dans l'eau :

L'aluminium peut se trouver sous plusieurs formes différentes dans les eaux des ressources employées pour l'eau potable. Comme on peut le voir sur la Figure 7, on le retrouve soit sous forme colloïdale insoluble, soit sous forme d'hydroxydes, de Silico-aluminates ou de composés libres et de complexes minéraux ou bien organique qui sont alors solubles. Ces composés peuvent, lors d'un traitement employant du chlore, former des composés organohalogénés comme des trihalométhanes (SONTHONNAX, J., 2014).



**Figure 07 :** Les différentes formes d'aluminium dans l'eau (SONTHONNAX, J., 2014).

On distingue deux types de ressources : l'eau superficielle (qui vient des lacs ou des rivières) et l'eau souterraine. L'eau « brute » superficielle contient, avant épuration une plus grande quantité d'aluminium que l'eau « brute » souterraine car, cet élément chimique est, à l'origine, présent dans les sols et ne s'infiltre que très peu aux pH des sols les plus fréquemment retrouvés. De ce fait, le traitement des eaux souterraines ne réduit que très peu la quantité totale en aluminium de l'eau potable alors que le traitement de l'eau superficielle réduit, quant à lui, fortement la quantité totale d'aluminium dans l'eau potable (SONTHONNAX, J., 2014).

Les eaux embouteillées peuvent également contenir de l'aluminium. On distingue plusieurs types d'eaux embouteillées : les eaux minérales naturelles, les eaux de sources et les eaux rendues potables par traitement (SONTHONNAX, J., 2014).

## 5. Différentes utilisations de l'aluminium :

L'aluminium métal et ses composés minéraux sont également utilisés dans les cas suivants :

### a. Aluminium métal :

- Fabrication d'alliages à base d'aluminium : plusieurs métaux peuvent être alliés avec l'aluminium, par exemple le cuivre, le silicium, le zinc, le magnésium, le manganèse ou bien le chrome, le lithium, le titane ;
- Fabrication de matériels utilisés dans divers secteurs :
  - câbles électriques aériens,

- industrie du bâtiment (portes et fenêtres),
- industrie automobile (pièces moulées résistantes et usinables),
- industrie aéronautique (pièces d'avion),
- constructions navale et ferroviaire ;
- Fabrication de panneaux de signalisation routière, d'emballages, d'ustensiles de cuisine et de produits destinés au conditionnement de denrées alimentaires (sous forme de feuilles d'aluminium ou de barquettes) ;
- Utilisation de l'aluminium sous forme de poudre en pyrotechnie et dans la formulation de certaines peintures (**Jargot et al., 2014**).

#### **b. Chlorure d'aluminium :**

Utilisé sous sa forme anhydre comme catalyseur (acide de Lewis) en synthèse organique dans les réactions de type « Friedel et Crafts » d'alkylation, d'acylation, comme catalyseur de polymérisation ; le chlorure d'aluminium hexahydraté est utilisé pour formuler des antiperspirants et des déodorants ; il est également employé comme flocculant et clarifiant pour le traitement des eaux (**Jargot et al., 2014**).

#### **c. Fluorure d'aluminium :**

Principalement dans le procédé électrolytique de production de l'aluminium, utilisation pour la formulation de flux de brasage, utilisation dans la fabrication de céramique ; il est également employé comme inhibiteur de fermentation et comme catalyseur en synthèse organique (**Jargot et al., 2014**).

#### **d. Sulfate d'aluminium :**

Utilisé pour le traitement des eaux et des boues d'épuration, comme flocculant dans l'industrie du papier, pour le tannage du cuir, comme mordant pour les textiles, comme intermédiaire de synthèse des zéolithes et autres dérivés d'aluminium et également comme catalyseur (**Jargot et al., 2014**).

#### **e. Hydroxyde d'aluminium :**

Utilisé comme intermédiaire de synthèse chimique ; il est aussi utilisé pour fabriquer les caoutchoucs et matières plastiques (en tant que retardateur de flamme), le verre, les céramiques, les encres, les peintures ; il entre aussi dans la composition de cosmétiques tels

que les antiperspirants et dentifrices ainsi que dans la composition de produits pharmaceutiques (Jargot et al., 2014).

**f. Nitrate d'aluminium :**

Utilisé pour le tannage du cuir, comme mordant pour les textiles, dans la fabrication des filaments incandescents, pour l'extraction de l'uranium, comme inhibiteur de corrosion, comme agent de nitration et également utilisé dans les produits antiperspirants (Jargot et al., 2014).

**6. Toxicité de l'aluminium sur les végétaux :**

Les plantes tirent des sols les éléments nécessaires à leur croissance. Elles sont donc sensibles à la composition du sol.

La pollution des sols, notamment par les métaux lourds dont la provenance est généralement industrielle, fait partie des multiples facteurs environnementaux préoccupants. A cause de sa toxicité pour les organismes vivants, et malgré sa légèreté, l'aluminium est bien souvent classé parmi les métaux lourds toxiques. La plupart des plantes sont sensibles à l'action toxique de l'aluminium (PILETTE, J., 2009).

La toxicité de l'aluminium pour les organismes vivants reste limitée s'il est lié à d'autres éléments comme le phosphore (phosphates), le soufre (sulfates), le fluor (fluorates), le silicium (silicates), ou s'il est combiné à des molécules organiques.

Le climat influence le processus de dissolution de l'aluminium du sol. Le réchauffement climatique augmente les précipitations et donc la dissolution subséquente de l'aluminium.

En milieu acide, l'aluminium se dissout facilement. Les processus naturels ou des activités humaines peuvent conduire à l'acidification des sols (pH <5,5), la production d'ions Aluminium (principalement  $Al^{3+}$ ) à partir des oxydes d'aluminium et de la phytotoxicité (Wang et al., 2006 ; Abate et al., 2013; Zhang et al., 2019).

Suivant la nature du sol, les plantes et les fruits accumulent plus ou moins d'aluminium dans leurs tissus. L'orge est considérée comme la plus sensible à la toxicité de l'aluminium parmi les espèces céréalières (Wang et al., 2006). Au niveau de la plante, on trouve une répartition de l'aluminium selon un gradient de concentration décroissant des racines jusqu'aux feuilles (CUNAT, L., 1999).

L'ion  $Al^{3+}$  agit sur la racine des plantes et arrête la croissance des jeunes pousses. C'est l'action la plus visible de l'aluminium sur les plantes. Mais un examen plus approfondi de cette action montre que l'aluminium agit à tous les niveaux du métabolisme de la plante et qu'il touche toutes les structures de la cellule végétale (**PILETTE, J., 2009**).

Certaines plantes ont développé des mécanismes pour lutter contre l'action toxique de l'aluminium. Il s'agit notamment d'une production accrue d'acides organiques, comme l'acide citrique ou l'acide malique, qui lient l'aluminium et l'empêchent d'exercer sur elles ses effets toxiques. Il peut s'agir aussi d'une production accrue d'enzymes destinés à lutter contre le stress oxydatif engendré par l'aluminium (**PILETTE, J., 2009**).

## **7. Cinétique de l'aluminium dans l'organisme :**

### **7.1. Absorption de l'Al :**

L'aluminium peut entrer dans l'organisme humain par les voies respiratoires, par la peau et les muqueuses, par la voie digestive et par injection (**PILETTE, J., 2009**).

#### **7.1.1. Absorption par inhalation :**

Bien que l'exposition par inhalation ne soit pas susceptible d'être une préoccupation de la population générale, fondeurs, et d'autres ouvriers en métal peuvent être exposés aux niveaux de poussière en l'aluminium toxiques et des aérosols. Quelques chercheurs ont constaté que deux soudeurs, chacun avec environ 20 ans d'exposition 3.0-8.9 mg d'aluminium/m<sup>3</sup>, ont excrété l'aluminium de 107-351 pg/l en leur urine et ont eu l'aluminium de 18-29 pg/g dans leurs os. Un groupe d'ouvriers exposés à l'aluminium assimilent des concentrations en aluminium dans le sang plus élevé, (0.33 P.M. ; 8.9 pg/l) que le groupe témoin (0.11 P.M. ; 3.0 pg/l) (**DeVoto et Yokel, 1994**).

Les soudeurs exposés aux vapeurs en aluminium ont excrété l'aluminium en urine à une concentration moyenne de 82 pg/l (3.0 P.M.). Les ouvriers exposés à < 1 mg d'aluminium/m<sup>3</sup> pour une moyenne de 7 ans éprouvés, ont présentés une forte concentration sérique en aluminium comparées aux témoins, mais l'excrétion urinaire était identique (**DeVoto et Yokel, 1994**).

L'exposition des lapins à 0.56 mg d'aluminium/m<sup>3</sup> plus de 5 mois menés à un 15.8-fois plus élevé d'Al accumulé dans le poumon (comparé au témoin), d'une augmentation 2.5-fois dans le cerveau, et d'une augmentation 1.65-fois accumulée en rein. On estime qu'environ 3% d'aluminium est existé dans le sang est absorbé par les poumons (**DeVoto et Yokel, 1994**).



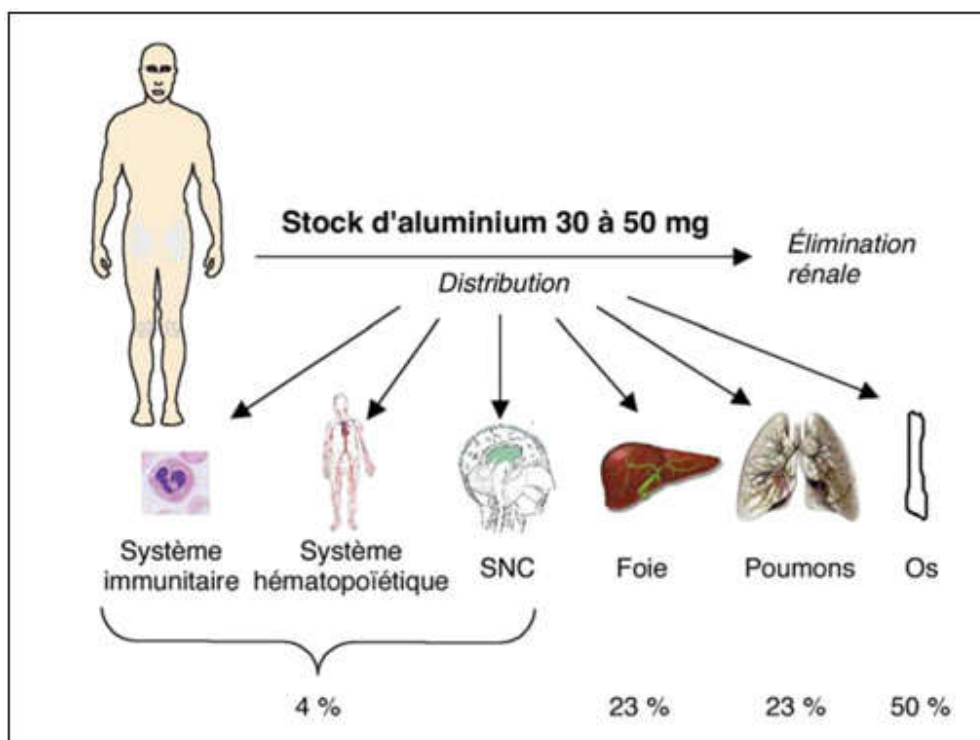
### 7.1.2. Absorption par voie cutanée :

L'absorption cutanée de l'aluminium a été peu étudiée. Une seule étude (**Flarend et al., 2001**), réalisée chez deux sujets : un homme et une femme ont exploré à l'aide de l'isotope  $^{26}\text{Al}$ , par la technique AMS (Accelerator mass spectrometry), l'absorption cutanée d'aluminium après une application unique de 84 mg de chlorhydrate d'aluminium (ACH) sous les aisselles. L'ACH est un complexe d'aluminium hydrosoluble utilisé comme principe actif dans de nombreux antiperspirants. L'étude a montré que l'aluminium a été absorbé et éliminé dès le premier jour suivant l'application et durant au moins 44 jours. La fraction absorbée, estimée à partir des concentrations urinaires, était de 0,012 % de la dose d'aluminium appliquée (**Gourier-Fréry et al., 2004**).

### 7.2. Distribution de l'aluminium dans l'organisme :

Chez l'Homme, 99% de l'aluminium sanguin va se retrouver dans le plasma en moins de 24 heures. Une fois dans le plasma, l'aluminium va se lier de façon préférentielle à la transferrine (80%), à l'albumine (10%) ainsi qu'aux protéines de bas poids moléculaire (10%). En fonction du couple formé, la distribution ne sera pas la même. En effet, tous les organes ne possèdent pas les récepteurs spécifiques à chaque couple. Ainsi, pour le couple «aluminium-transferrine», la distribution se fera principalement au niveau du foie, de la rate et dans une moindre mesure au niveau des parathyroïdes. Le couple «aluminium-protéine» de bas poids moléculaire, va quant à lui atteindre majoritairement les os où il n'y a pas de récepteurs à la transferrine.

La charge totale en aluminium du corps humain est généralement comprise entre 30 et 50 mg (**Figure 08**). Cette charge va essentiellement être répartie dans les os (50%), les poumons (environ 23%) et le foie (environ 23%). Ce qui reste va être partagé entre les différents organes du système immunitaire, hématopoïétique et du système nerveux central (**Gourier-Fréry et al., 2004 ; AFSSAPS, 2011**).



**Figure 08 :** Absorption quotidienne et distribution de l'Aluminium dans l'organisme humain (Gourier-Fréry et al., 2004).

### 7.3.Élimination :

La majorité de l'aluminium ingérée (95%) n'est pas absorbée et se retrouve dans les fèces. Pour l'aluminium absorbé dans le sang, la principale voie d'élimination jusqu'à 83% est la voie rénale. L'élimination urinaire chez les individus à fonction rénale normale est comprise entre 3 et 20 $\mu$ g/l (Lauwerys et Hoet., 2001).

Des recherches ont montré que l'Aluminium prit par voie intraveineuse sous forme de citrate d'aluminium a excrété tout sauf 10-15% de l'aluminium pendant le premier jour (DeVoto et Yokel, 1994). L'analyse de ces résultats suggère que la demi-vie d'élimination de l'aluminium du corps entier augmente avec le temps après exposition, elle dépend de la durée d'exposition et de la redistribution de l'aluminium à partir des sites de stockage et peut aller jusqu'à quelques années. Elle est tri-phasique : la demi-vie d'élimination initiale est de quelques heures, celle de la phase suivante est de quelques semaines, et la dernière est généralement supérieure à un an (DeVoto et Yokel, 1994).

### 8. Toxicité de l'aluminium :

L'aluminium aurait un pouvoir toxique pour l'Homme. Pour certains chercheurs, cette toxicité est relative et s'observerait uniquement chez des sujets particuliers et exposés à de fortes doses

d'aluminium. Pour d'autres, ce métal qui est omniprésent dans notre quotidien posséderait une toxicité au long cours, même pour des sujets exposés à des faibles doses d'aluminium. Si l'on suit cette hypothèse, l'aluminium représenterait donc un risque sanitaire pour l'ensemble de population (SONTHONNAX, J., 2014).

### **8.1.Toxicité aiguë :**

L'intoxication aiguë correspond à une intoxication causée par de fortes quantités de toxique sur une période très brève. Comme les cas d'intoxications aiguës à l'aluminium sont très rares, il existe par conséquent peu de données sur cette toxicité. Les sels solubles d'aluminium (chlorure, fluorure, sulfate et citrate) sont généralement les causes de ces intoxications.

Chez l'homme, il y a peu de cas de décès par ingestion d'une importante quantité d'aluminium. Les cas recensés sont liés à des ingestions volontaires (suicides) ou accidentelles de pesticides (présence de phosphore d'aluminium). Dans ces cas-là, ce n'est pas directement l'aluminium qui a été mis en cause, mais le gaz phosphine qui a été produit au niveau gastro-intestinal (Gourier-Fréry et al., 2004).

### **8.2.Toxicité chronique :**

#### **8.2.1. Effets neurologiques :**

Bien que l'aluminium a été impliqué dans divers types de maladies neuro- dégénératives comme le parkinsonisme, la maladie d'Alzheimer et des anomalies du tube neural, le mécanisme de la neurotoxicité initiée par l'Aluminium n'a pas été divulgué de manière absolue (Guillard et al., 1996).

Le mécanisme de neurotoxicité de l'aluminium fait l'objet de recherche soutenue et de plusieurs études. Cette analyse a pour but de résumer brièvement les domaines de recherche concernant le mode d'action de la toxicité de l'aluminium, pour lequel la plupart des tests ont été réalisés sur des rongeurs de laboratoire ou dans le cadre d'études in vitro, et de présenter les opinions variées sur la pertinence de ces données à la neurodégénérescence humaine, plus particulièrement le développement de la maladie d' Alzheimer (TAÏR, K., 2017).

Des études sur des animaux de laboratoire et des êtres humains ont démontré que l'aluminium absorbé se distribue au cerveau, plus particulièrement au cortex cérébral et à l'hippocampe. Par exemple, l'accumulation d'aluminium dans le cerveau de souris, de rats et de singes adultes exposés a été signalée dans 23 études portant sur les effets neurologiques de l'aluminium administré oralement. Des concentrations plus élevées d'aluminium ont été

observées dans le cerveau de chiots exposés durant la gestation par (**Sharma et Mishra, 2006**), mais pas par d'autres (**Colomina et al., 2005**). D'autres études sur l'exposition prénatale pour lesquelles l'exposition s'est poursuivie durant la période de lactation ont aussi signalé des concentrations plus élevées d'aluminium dans le cerveau (**Wang et al., 2002; Chen et al., 2002; Golub et al., 1993**). Par contre, (**Golub et Germann, 2000**) ont observé une baisse des concentrations d'aluminium dans le cerveau de souris exposées durant la gestation, la lactation et leur vie entière.

### 8.2.2. Effets immunitaires et allergiques :

L'aluminium possède un fort pouvoir immunogène, surtout dans sa forme cristalline (hydroxyde d'aluminium). Cette propriété fait que l'aluminium est utilisé depuis de nombreuses années comme adjuvant vaccinal (**Klein et al., 2014**). Des réactions allergiques à l'aluminium ont été observées et s'expriment principalement par des réactions locales au point d'injection après une vaccination et des irritations cutanées après application de déodorant à base de sels d'aluminium. Concernant, les réactions locales au point d'injection après vaccination, des études comme celle de Barbaud en 1995 mettent en évidence que ce sont bien les sels d'aluminium qui en sont responsables. Des cas d'irritations cutanées après application de déodorants ont été observés par Gallego en 1999 (**Exley et al., 2010**).

### 8.2.3. Effets cancérogènes :

Les études sur les cancers ne s'intéressent pas directement à l'aluminium, mais évoquent à l'exposition aux hydrocarbures aromatiques polycycliques. Ces études ont fourni des résultats concernant la mortalité dans le secteur de l'industrie de production primaire de l'aluminium et la production d'abrasifs (**Ronneberg et al., 1999**). Le risque de cancer de la vessie essentiellement en lien avec l'emploi dans le secteur de l'électrolyse et les expositions aux hydrocarbures polycycliques a été étudié par (**Thériault et al., 1981**).

L'étude de (**Schroeder et al., 1997**) porte sur le risque de cancer du poumon et s'intéresse à l'exposition aux fluides d'usinage contaminés par l'aluminium dans l'industrie de l'automobile. Le rôle propre à l'aluminium dans la survenue des cancers n'a jamais été exploré lors de la comparaison des taux d'incidence ou de mortalité avec ceux observés en population générale (**Gourier-Fréry et al., 2004**).

# Partie expérimentale

# Chapitre 3 : Matériels et Méthodes

## Matériels et Méthodes :

Le chapitre matériel et méthodes de cette Mémoire décrit le protocole expérimentale mise en œuvre pour évaluer l'effet du l'aluminium sur la germination et sur la croissance du l'orge et déterminer la concentration du l'aluminium que l'orge peut l'accumuler sans modification sur les paramètres physiologique et biochimique.

### 1. Matériel végétal:

Notre choix pour la matière végétale s'est porté sur la variété de l'orge (*Hordeum vulgare* cv. Saida) constitue la base de l'alimentation algérienne d'où leur grande consommation. Les graines sont fournies par ITGC de Saida. Le choix de cette plante revient à leur haut rendement et sa résistance à divers contraontes.les paramètres phénologiques, les paramètres morphologiques et le degré de tolérance aux stress abiotiques sont dans le tableau ci-dessous :

variété	origine	caractéristiques agronomiques et culturales	caractéristiques technologiques	Résistance aux maladies et aux différentes conditions climatiques
Saida	Variété d'orge locale	Rendement élevé (elle occupe 72% du sol semencier de l'orge) (INRAA, 2006)	- PMG: élevé - Mitadinage : résistance	- Rouilles: moyennement sensible - Oidum: très sensible - Résistante à la sécheresse et au froid

**Tableau 13 :** les caractéristiques agronomiques de la variété de l'orge Saida.

### 2. Condition de l'essai:

L'essai a été réalisé au niveau du laboratoire de biologie végétale de l'université de Saida. Les graines sont sélectionnées et désinfectées par l'hypochlorite de sodium à 2% pendant 5 min pour éliminer toute contamination fongique puis rincée rigoureusement et abondamment à l'eau distillée 3 à 4 fois pendant 5 min puis séchés avant la mise en germination (AOUMEUR, H., 2012). Elles sont ensuite, mises à germés dans des boites de pétri sur du papier filtre (10 graines par boite), 5 jours après, les plantules (stade de la première feuille apparue) ont été transplantés dans des pots en plastique remplis avec la même quantité de

substrat (2/3 terreau et 1/3 sable). Ces plantes sont traitées par un métal (Aluminium) ajouré à l'eau, à raison de quatre concentrations différentes (25, 50, 75, 100  $\mu\text{M}$ ) contre un lot témoin.

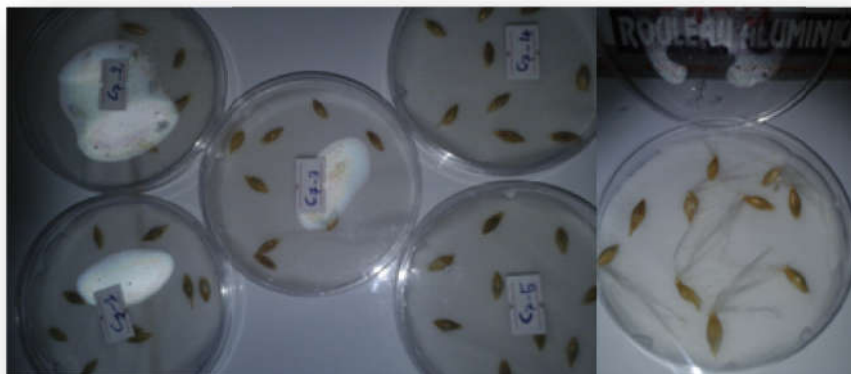
**a. le substrat:**

Le substrat utilisé est constitué du mélange du sable et de terreau industriel à des proportions respectives de 1 volume de sable avec deux volumes de sol. Avant d'utiliser le sable, il doit subir plusieurs opérations de préparation, en premier lieu il a été tamisé avant d'éliminer les débris végétaux et animaux pour obtenir du sable fin, puis rincé abondamment à l'eau de robinet, ensuite trempé dans une solution de HCL diluée dans l'eau distillée de 1/5 pour éliminer les sels (chlorures, les carbonates), le sable est ensuite rincé plusieurs fois par l'eau distillée, et séché à l'air libre (AOUMEUR, H., 2012).

La nutrition hydrominérale des plantes est assurée par l'arrosage fait trois fois par semaine à l'eau distillée (pour les lots témoin), avec les solutions de l'aluminium (pour les plantes stressées).



**Figure 09:** La désinfection des grains d'orge (*Hordeum vulgare*).



**Figure 10:** la germination dans des boites de pétri.



### 3. Récoltes des plantes:

A la fin de l'expérimentation (4 semaines de culture), les plantes sont débarrassées de leur substrat, les plantes rincées par l'eau distillée, puis séchées sur papier filtre.

### 4. Paramètres étudiés:

Les mesures effectuées sur les paramètres morphologiques des plantes (nombre de feuilles et racines, hauteurs de parties aériennes et racinaires) ont été réalisées chaque semaine de l'exposition à l'aluminium. Par ailleurs l'étude des paramètres physiologiques, biochimiques a été réalisée à la fin de l'expérimentation.

#### 4.1. Paramètres morphologiques:

##### 4.1.1. Pourcentage de germination:

La germination est une phase physiologique qui correspond à la transition de la phase de vie latente de la graine sèche à la phase de développement de la plantule.

Le taux de germination est exprimé par le pourcentage des graines germées par rapport au nombre total des graines par boîtes de Pétri. Rappelons que la germination des grains est considérée positive quand les radicules atteignent 5mm de longueur (**Kaur et Duffus, 1989**).

Le pourcentage définitif de germination (%) est déterminé par la relation suivante :

$$\text{Taux de germination \%} = \frac{NG}{NGG} \times 100$$

NG: nombre de graines germées.

NGG: nombre de graines mises à germer.

##### 4.1.2. Vitesse de germination:

La vitesse de germination est déterminée par la formule suivante (**BOUCHELAGHEM, S., 2012**) :

$$VG: (ngg1^{er} \text{ jour})/1 + (ngg2^{ème} \text{ jour})/2 + \dots + (ngg n^{ème} \text{ jour})/n$$

VG: vitesse de germination.

Ngg: nombre de graines germées.

##### 4.1.3. Mesure des paramètres de croissance:

###### a. Nombre moyen des feuilles:

Le nombre de feuilles de chaque plante a été déterminé à partir de la deuxième semaine durant l'expérimentation.

**b. Longueur moyen des feuilles:**

La hauteur des feuilles de chaque plante a été mesurée chaque 2 jour durant l'exposition au l'aluminium.

**c. Nombre moyen des racines:**

Chaque graine qui a germé est retirée de la boîte de pétri puis le nombre de racines est déterminé. Le nombre moyen de racines est établi pour chaque graine, pour chaque condition de traitement et pour le temps de germination.

**d. Longueur moyenne des racines:**

Les graines sont délicatement retirées des boîtes de pétris puis à l'aide d'un crayon on marque les extrémités de chaque racine pour mesurer ensuite sa longueur.

**4.2. Paramètres biochimiques:**

**4.2.1. Détermination des concentrations des pigments photosynthétique:**

Les concentrations des chlorophylles (a ; b) ont été évaluées en adoptant la méthode donnée par (Arnon., 1949). Les mesures optiques ont été mesurées à des longueurs d'onde de 663 et 645nm.

- 0,5 g des feuilles coupés dans un mortier maintenu à la glace + une pincée de sable stérilisé et une pincée de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) pour neutraliser l'acidité du milieu.
- L'ensemble est broyé avec 4ml d'acétone à 95%.
- Le broyat est centrifugé à 2500t/ 5min.
- 1ml de surnageant est prélevé + 4ml d'acétone à 95% (En agitant bien le mélange).
- La densité optique (DO) des extraits pigmentaires est lue respectivement à 645 et 663nm

Les concentrations en mg/ l de solutés des chlorophylles sont données par les formules suivantes (Taffouo et al., 2008).

$$\text{Ch a} = 12,7 - 2,69 x$$

Où:

$$\text{Ch b} = 22,99 x - 4,68 y$$

x : est l'absorbance de chlorophylle à 645 nm.

$$\text{Ch (a+b)} = 20,21 x + 8,02 y$$

y : est l'absorbance de chlorophylle à 663 nm.

#### 4.2.2. Détermination des concentrations des sucres solubles totaux:

Les sucres solubles sont dosés selon **(Dubois et al., 1956)**.

- 100 mg de racines ou feuilles mise dans des tubes à essai.
- L'extraction des sucres solubles se fait après macération du végétal dans l'éthanol à 80% (2ml) pendant 48 heures à l'obscurité.
- Au moment du dosage, les tubes sont placés dans l'étuve à 80°C pour faire évaporer l'alcool.
- Dans chaque tube, on ajoute 20 ml d'E.D à l'extrait (C'est la solution à analyser).
- Dans des tubes à essai propres, on introduit 1 ml de phénol à 5%.
- Les tubes sont soigneusement agités.
- Ajouter à l'aide d'une pipette 5ml d'acide sulfurique concentré 96%.
- Vortex, les tubes sont maintenus à 100°C pendant 5 min.
- Refroidir les tubes dans un bain glacé.
- placer les tubes à l'obscurité pendant 30 min.

Les mesures d'absorbance sont effectuées à une longueur d'onde de 492 nm ou 480 nm.

La courbe d'étalonnage est réalisée selon l'équation suivant :  $Y = 39,94 X$

#### 4.2.3. Dosage des protéines:

Les protéines sont dosées selon la méthode colorimétrique de **(Bradford., 1976)**, qui utilise le bleu brillant de Coomassie G250 (BSA) comme réactif et sérum d'albumine bovine (BSA) comme standard.

Les absorbances sont lues à une longueur d'onde de 595 nm. Le dosage s'effectue en 3 étapes:

##### 4.2.3.1. Préparation de l'échantillon:

(0,1g) de l'échantillon de chaque concentration est broyé dans un mortier avec 5ml d'eau distillée, puis filtré et versé dans des tubes avec 5 autres contenant de l'eau distillée.

#### 4.2.3.2. Préparation de réactif de Bradford:

Pour préparer ce réactif, il faut prendre 0,1g de BBC (Bleu Brillant de Coomassie), lui ajouter 50 ml d' éthanol à 95% puis le placer sur un agitateur pendant 2 heures. Rajouter ensuite 100 ml d' acide ortho phosphorique à 85% et compléter à l' eau distillée jusqu'à 1 litre.

#### 4.2.3.3. Préparation de la solution mère:

Solution mère de BSA (Albumine Sérum de Bœuf) à 1mg/ml dans l' eau distillée.

- BSA = 1mg
- Eau distillée = 1ml

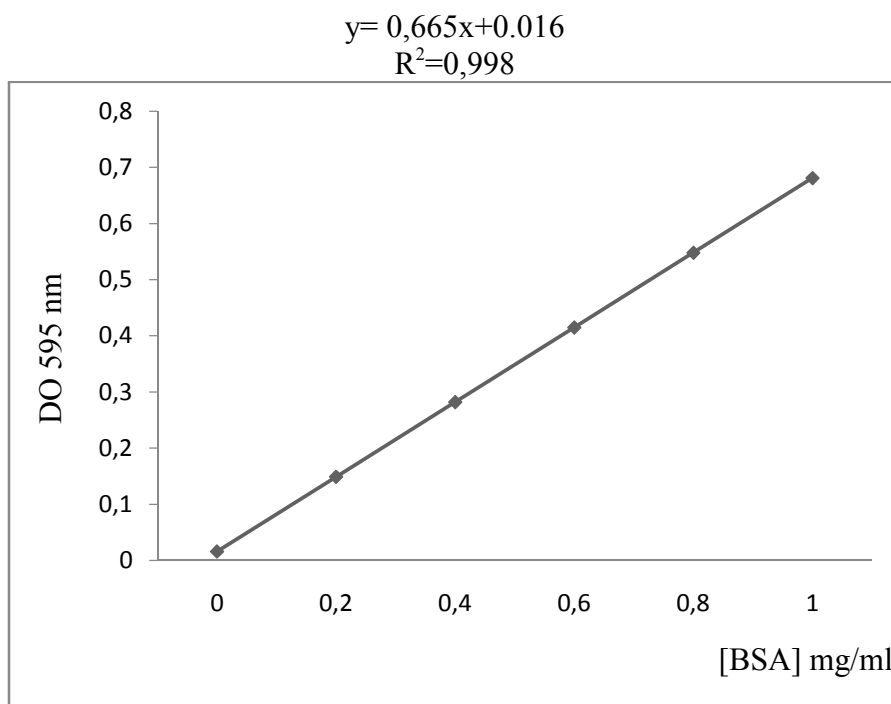
#### Réalisation du gramme détalonnage:

Tube à essai	1	2	3	4	5	6
BSA (µl)	0	20	40	60	80	100
H2O distillée (µl)	100	80	60	40	20	0
BBC (ml)	4	4	4	4	4	4
BSA (µg)	0	20	40	60	80	100

- Agiter les tubes par vortex.
- absorbance à une longueur d' onde de 595 nm → Coloration bleue.

#### Dosage des l' échantillons:

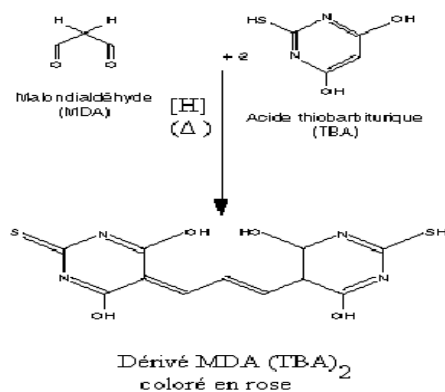
- 100µl du surnageant + 4 ml de BBC.
- Agiter les tubes par vortex.
- Lecture des absorbance à 595 nm.
- Contre un blanc avec 100µl d' eau + 4 ml de BBC.



**Figure 11:** La courbe d'étalonnage utilisée (BSA 1 mg/ml) pour le dosage des protéines.

#### 4.2.4. Evaluation de la peroxydation lipidique (Dosage du MDA):

Le principe de ce dosage est basé sur la condensation de MDA en milieu acide et à chaud avec l'acide thiobarbuturique. La réaction entraîne la formation d'un complexe de couleur rose entre deux molécules d'acide thiobarbuturique qui peut être donc mesuré par spectrophotométrie d'absorption à 530 nm.



**Figure 12:** principe du dosage du malondialdéhyde.

##### a. Extraction:

- 1g de MF homogénéisé dans 5 ml de TCA 0,1% dans un mortier maintenu à la glace.
- Le broyant est centrifugé à 12000T/ min.
- Le surnageant est récupéré pour le dosage du MDA et H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

**b. Détermination de la concentration des Malondialdéhyde (MDA):**

- 1ml de surnageant +1ml de TBA 0,5% dans TCA20%
- Le mélange est incubé à 95°C pendant 30min
- Refroidissement dans un bain glacé
- Centrifugation à 12000T/ min pendant 20 min

Mesurer l'absorbance par spectrophotométrie à 532nm.

**c. Calcul de la concentration :**

On calcule la concentration de MDA exprimé en nano moles par milligramme de protéines (nmol/mg port) selon la formule suivante:

$$C = \frac{Do. 10_6}{\varepsilon. \chi. L. Fd}$$

- **C:** Concentration de MDA en nmol/mg de protéines.
- **DO:** Densité optique lue à 530 nm.
- **$\varepsilon$  :** Coefficient d'extinction molaire du MDA,  $\varepsilon$  MDA=1.56×10<sup>5</sup> M<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup> ;
- **L:** Longueur du trajet optique=1cm ;
- **$\chi$  :** concentration du surnageant en protéines (mg/ml) ;
- **Fd:** Facteur de dilution, Fd

**4.2.5. Exploration du stress oxydant:****4.2.5.1.Préparation de l'extrait enzymatique:**

Les échantillons des racines et des feuilles (environ 0,5g) sont homogénéisés dans un 10 ml de tampon phosphate (50mM, pH=7,8) dans un bain de glace. L'extrait brut est ensuite centrifugé à 12000 tours/min pendant 15 min. Le surnageant est stocké à 4°C et utilisé pour les dosages enzymatique. La quantification des différentes mesures spectrophotométriques suite aux dosages enzymatiques (Servais et al., 2004).

**4.2.5.2.Détermination de l'activité de la catalase:**

Les catalases sont présentes dans un grand nombre de tissus. Ce sont des enzymes tétramériques, chaque unité portant une molécule d'hème et une molécule de NADPH. Ces enzymes interviennent dans la défense de la cellule contre le stress oxydant en éliminant les espèces réactives et en accélérant la réaction spontanée de l'hydrolyse du peroxyde

d'hydrogène ( $H_2O_2$ ) toxique pour la cellule en eau et en oxygène (Aebi, H., 1984). La réaction se fait en deux étapes. La réaction bilan est:



L'activité de la CAT est mesurée à 240nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV/visible par la variation de la densité optique consécutive à la dismutation du peroxyde d'hydrogène.

Réactif	Blanc (µl)	Essai (µl)
Tampon phosphate (PBS) (0,1M, PH 7,4)	800	780
$H_2O_2$ (0,5M)	200	200
E extrait	-	20

**Tableau 14** : les valeurs mesurées dans le dosage du catalase.

- Régler le zéro de l'appareil par la solution PBS.
- La lecture de l'absorbance se fait à 340 nm après 15s de délai et durent 60s de mesure.

L'activité de la CAT exprimée en micromoles de  $H_2O_2$  par minute par milligramme de protéines ( $\mu\text{mol}$  de  $H_2O_2$ /min / mg prot).

#### 4.2.5.3. Dosage de glutathion (GSH):

Le glutathion est un thiol intracellulaire le plus abondant présent dans toutes les cellules. Le Glutathion réduit est analysé selon la méthode de (jollow et al., 1974). Le mélange de la réaction contenant:

- 0,5ml d'échantillon + 1ml d'acide sulfosalicylique 4%.
- Maintenu à 4°C pendant 1 heure.
- Centrifuger à 1200t/m pendant 15 min.
- 0,1 ml de surnageant et 2,7ml du tampon 0,01M, PH=07

La lecture a été faite immédiatement à 412nm.

#### Calcul de la concentration :

On calcule la concentration du GSH exprimée en nano moles par milligramme de protéines (nmol/ mg prot) selon la formule suivante:

$$GSH = \frac{Do \times L \times 2,8}{13,1 \times 0,8 \times 0,5 \times \text{mg prot}}$$

- **DO:** Densité optique ;
- **L:** volume total des solutions utilisées dans la déprotéinisation ;
- **2,8:** volume total des solutions utilisées dans le dosage du GSH au niveau du surnageant ;
- **13,1:** Coefficient d'absorbance du groupement -SH à 412nm ;
- **0,5:** volume de l'extrait ;
- **0.1:** volume du surnageant.

#### **4.2.5.4. Dosage de l'activité superoxyde-dismutase (SOD) (EC 1.15.1.1) :**

Les méthodes de dosage des SODs sont indirectes et sont basées sur leur capacité à inhiber des réactions générées par  $O_2^{\bullet -}$ . La détection de l'anion superoxyde ( $O_2^{\bullet -}$ ) est basée sur son aptitude à réduire un groupe Nitro Blue tétrazolium (NBT) (Kubis, J., 2008). Des feuilles et des racines de (0,1g) ont été découpées en fragments de 1mm et immergées dans 10 mM de tampon potassium phosphate (PH 7,8), contenant 0,05% (p/v) NBT et 10 mM de  $NaN_3$ , et incubées pendant 1h à température ambiante. Après incubation, 2 ml de la solution de réaction ont été chauffés à 85 °C pendant 15 minutes et refroidis rapidement. La densité optique a été mesurée à 580 nm et la teneur en  $O_2^{\bullet -}$  a été exprimée comme une augmentation de l'absorption par poids sec.



# Chapitre 4 : Résultats et interprétations

## Résultats :

Cette partie comporte les résultats de l'impact de l'aluminium sur quelques paramètres morpho physiologiques, biochimiques et enzymatiques sur la plante de l'orge (*Hordeum vulgare*).

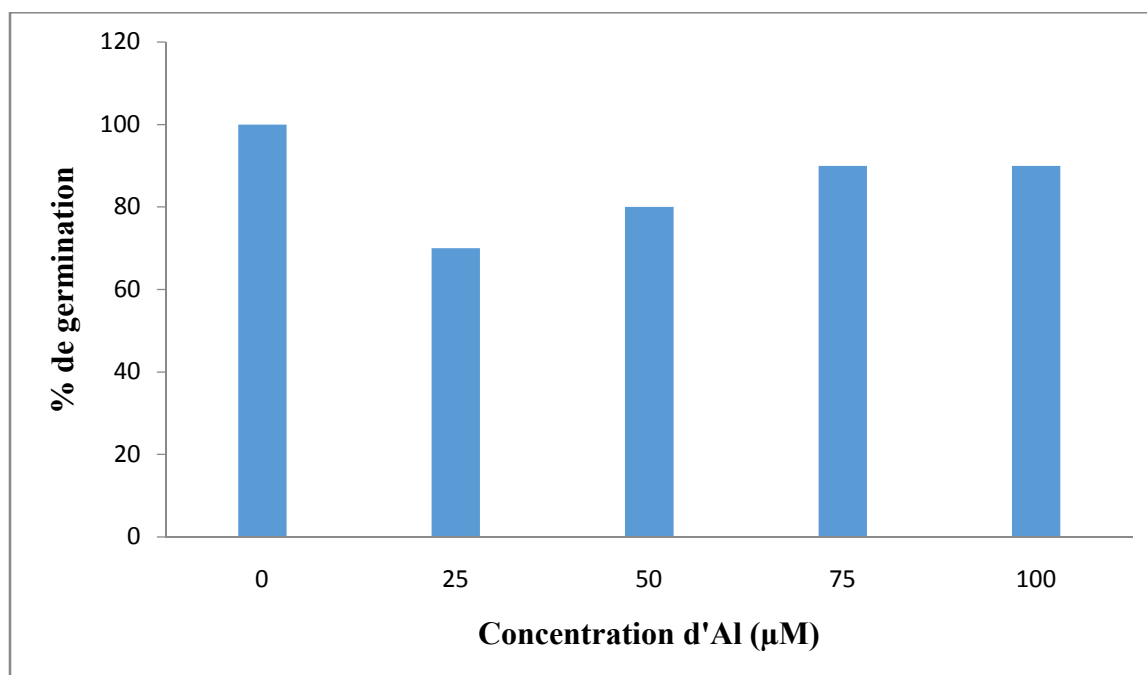
### 1. L'effet de l'aluminium sur les paramètres morphologiques:

#### 1.1.L'effet de l'aluminium sur la germination :

On a réalisé quatre concentrations de l'aluminium (25, 50, 75, 100  $\mu\text{M}$ ) et un témoin (eau distillée), la germination se fait dans des boîtes de pétri pendant sept jours :

[C]	t	C1	C2	C3	C4
% de Germination	100	70	80	90	90

**Tableau 15 :** Taux de germination des graines en fonction de la concentration en aluminium après une semaine d'exposition.



**Figure 13 :** Taux de germination des graines en fonction de la concentration en aluminium après une semaine d'exposition.

L'exposition des graines de l'orge (*Hordeum vulgare*) à l'aluminium pendant la période de germination à des concentrations allant de 0 à 100  $\mu\text{M}$  n'a pas provoqué une diminution du taux de germination, 70, 80, 90,90 à des concentrations de l'aluminium 25, 50, 75,100 respectivement par rapport au témoin dont le taux de germination est de 100%.

## 1.2. Effet du l'aluminium sur la croissance :

### 1.2.1. Effet du l'aluminium sur la croissance des feuilles de l'orge :

D'après les résultats qu'on a obtenus montre que l'aluminium provoque des dépigmentations au niveau des feuilles dans les concentrations 25  $\mu\text{M}$  et 50  $\mu\text{M}$  (**figure 14**), l'aluminium influe sur les pigments photosynthétiques, il inhibe la synthèse de la chlorophylle au niveau de la plante.

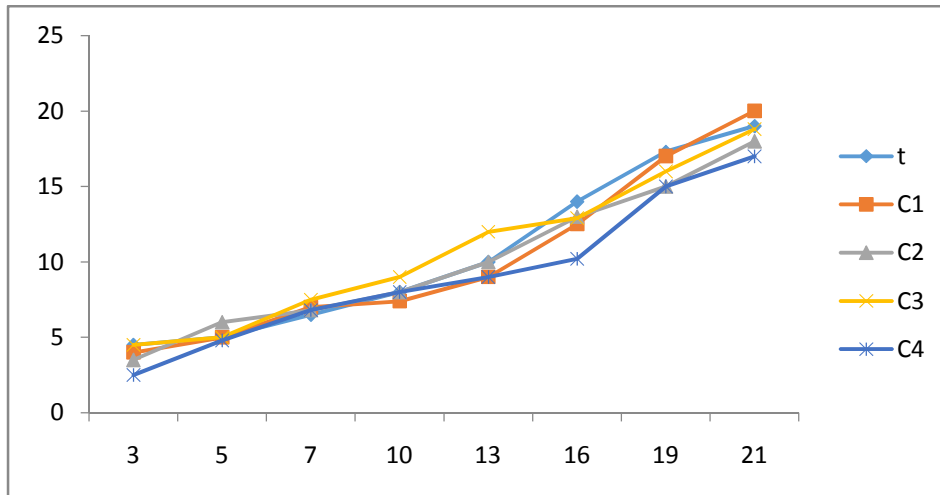


**Figure 14** : l'effet du l'aluminium sur la croissance des feuilles (1 : les feuilles d'une plantes témoin ; 2 : une feuilles d'une plante C1).

Durant de cet essai, on remarque une petite diminution de l'espaces foliaires au niveau des plantes C4, mais concernant les plantes C1, C2, C3 et mêmes les témoins ont une croissance presque similaire.

jour	3	5	7	10	13	16	19	21
témoins	4,5	5	6,5	8	10	14	17,3	19
C1	4	5	7	7,4	9	12,5	17	20
C2	3,5	6	6,8	8	10	13	15	18
C3	4,5	5	7,5	9	12	12,9	16	18,8
C4	2,5	4,8	6,8	8	9	10,2	15	17

**Tableau 16** : l'effet du l'aluminium (25, 50, 75, 100  $\mu\text{M}$ ) sur l'évolution de la longueur du feuilles en fonction du nombre des jours.

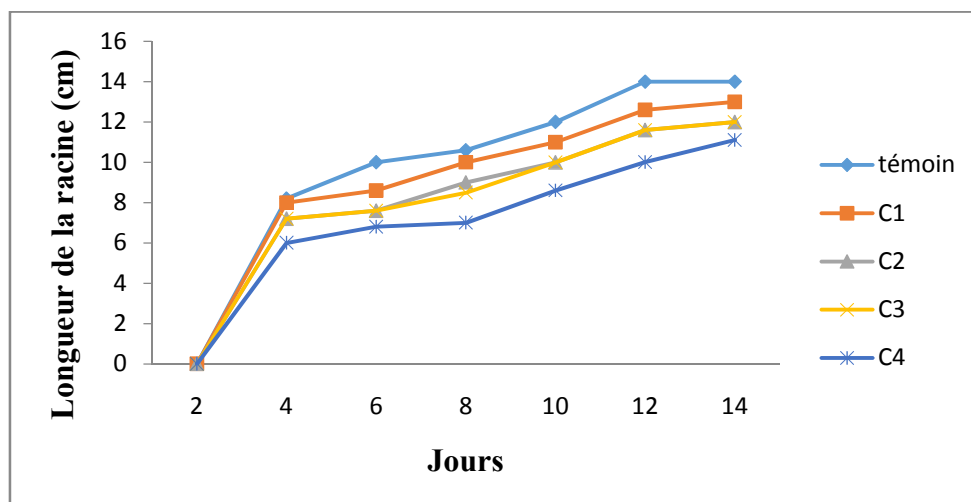


**Figure 15 :** l'effet de l'aluminium (25, 50, 75, 100  $\mu\text{M}$ ) sur l'évolution de la longueur du feuilles en fonction du nombre des jours.

### 1.2.2. Effet du l'aluminium sur l'évolution des racines :

Le système racinaire est perturbé de manière visible dès le traitement avec 100  $\mu\text{M}$  de l'aluminium. La longueur de la racine principale est réduite par rapport aux témoins et les racines secondaires sont beaucoup plus petites. En effet l'élongation racinaire des plantes de l'orge (*Hordeum vulgare*) passe de 100  $\mu\text{M}$  14 (cm) chez les plantes témoins à 11.1 (cm) chez les plantes traitées par la concentration de 100  $\mu\text{M}$  (**Figure 16**).

La réduction du nombre des racines devient de plus en plus forte en fonction de la dose de métal appliquée.



**Figure 16 :** l'effet de l'aluminium (25, 50, 75, 100  $\mu\text{M}$ ) sur l'évolution des racines en fonction du temps.

## 2. L'effet du l'aluminium sur les paramètres biochimiques :

### 2.1. Influence du l'aluminium sur la synthèse des pigments photosynthétique :

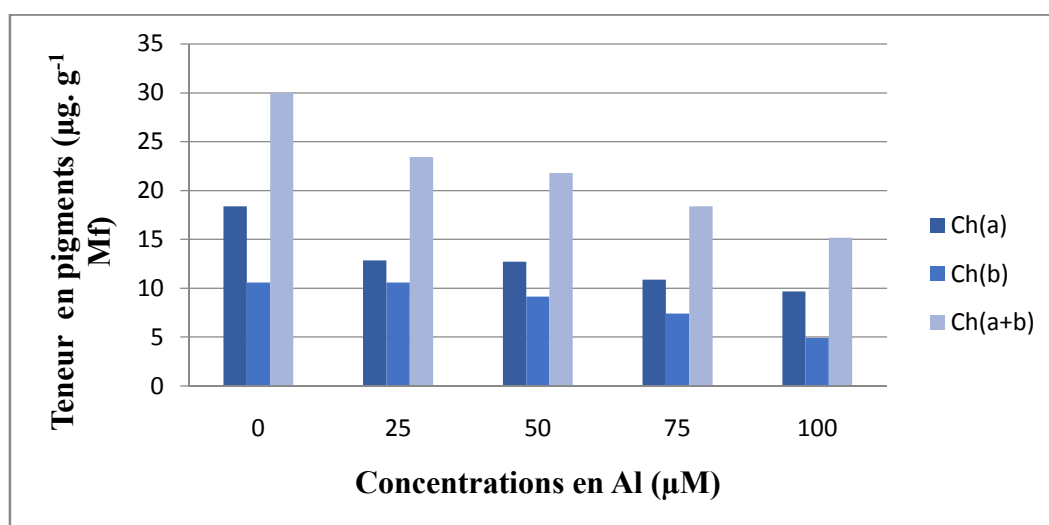
Un retard de la croissance des plantules de l'orge (*Hordeum vulgare*) sous l'effet de l'application du l'aluminium à été associée à une diminution des concentrations de la Ch (a) et Ch (b) et Ch (a+b) (**figure 17**).

Les concentrations des chlorophylles au niveau des feuilles diminuent lorsque la concentration du l'aluminium augmente. En effet le contenu en chlorophylle (a+b) a été réduit d'une manière proportionnelle (plus la dose du polluant est forte plus la réduction est importante). Quant on considère les types de chlorophylle indépendamment, on remarque que la quantité du Ch (a) est supérieur que la chlorophylle (b).

Une baisse importante de la teneur en chlorophylle à été observée à 75 et 100  $\mu\text{M}$  par rapport au témoin, les concentrations en Ch (a) et Ch (b) et Ch (a+b) passent de (18,4 ; 10,6 ; 30  $\mu\text{g. g}^{-1}$  MF) au niveau des plantes témoin, à (9,68 ; 4,92 ; 15,18  $\mu\text{g. g}^{-1}$  MF) au niveau de la plus forte concentration (100  $\mu\text{M}$ ). La diminution de la quantité des chlorophylles est un symptôme de la toxicité.

Concentrations	témoin	C1	C2	C3	C4
Chlorophylle a	18.14	12.86	12.7	10.88	9.68
Chlorophylle b	10.6	10.6	9.14	7.42	4.92
Chlorophylle a+ b	30	23.42	21.8	18.4	15.18

**Tableau 17:** Effet du l'aluminium sur le contenu en pigments chlorophylle (a), chlorophylle (b), chlorophylle (a+b).

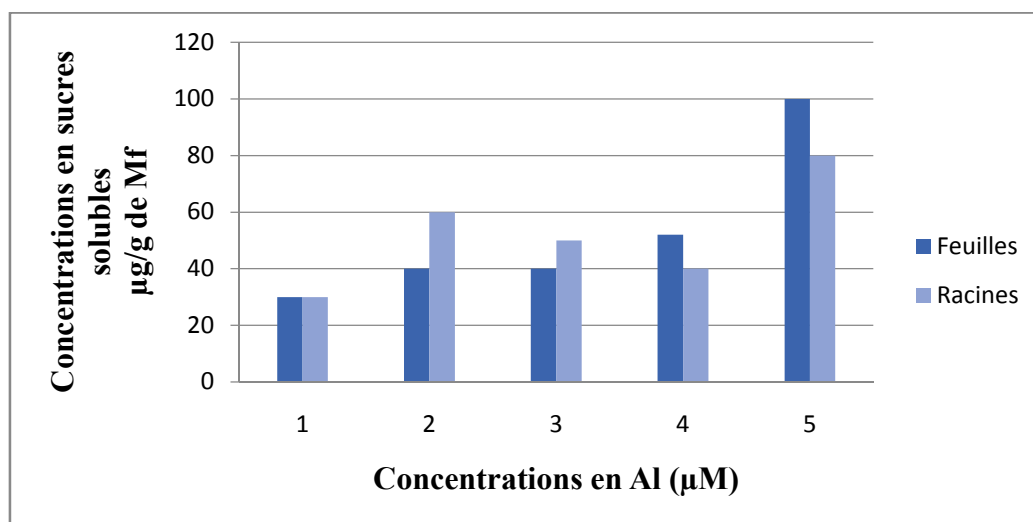


**Figure 17 :** Effet du l'aluminium sur le contenu en pigments chlorophylles (a ; b ; a+b).

## 2.2. Influence du l'aluminium sur la teneur en sucres:

Le contenu en sucres solubles des extraits des feuilles et des racines des plantules est consigné dans la **figure 18**. L'addition de l'aluminium produit une forte élévation de la teneur en glucides. Au niveau foliaire, les concentrations des sucres solubles totaux augmentent dans les racines traitées par rapport à celles des racines témoins, en effet les concentrations des sucres solubles dans les racines témoins sont de 30  $\mu\text{g/g}$  MF tandis que dans les racines traitées avec 100  $\mu\text{M}$  sont de 100  $\mu\text{g/g}$  MF.

Au niveau racinaire, nous notons également une augmentation hautement significative des concentrations des sucres solubles totaux dans les différents traitements par rapport à celle du témoin, cette augmentation atteint au niveau maximal à la concentration la plus élevée 100  $\mu\text{M}$ .



**Figure 18 :** Effet de l'aluminium sur le contenu en sucres solubles dans les feuilles et racines de l'orge.

## 2.3. L'effet de l'aluminium sur le taux des protéines totales :

La teneur en protéines solubles totales est un test souvent utilisé pour mettre en évidence un stress chez la plante et l'étude de ce paramètre est indispensable dans l'étude des mécanismes enzymatiques **Figure 19**.

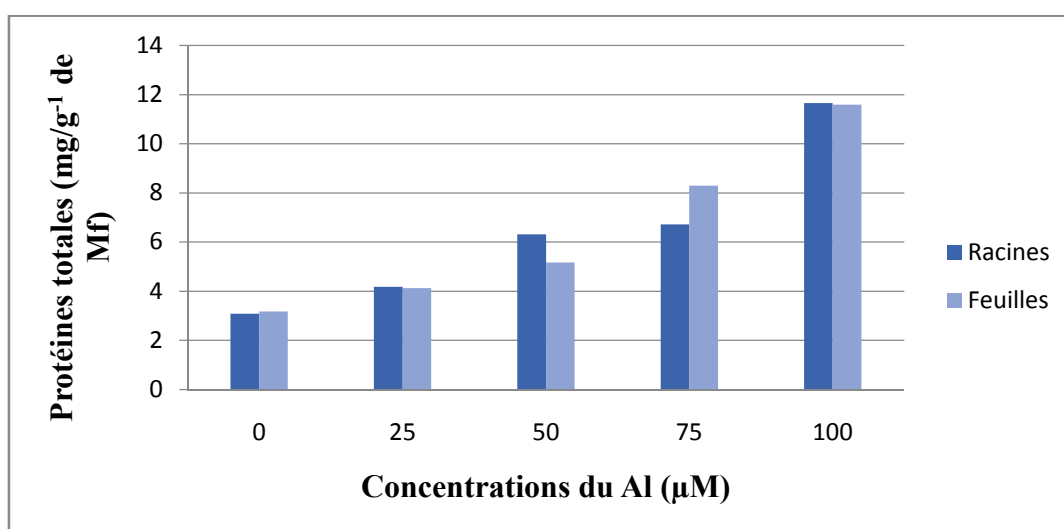
Au niveau foliaire, les résultats montrent une augmentation des concentrations des protéines totales dans les feuilles des lots traités par rapport à celle des lots témoins, cette augmentation est estimée à environ 30% au niveau des feuilles traitées par la plus forte concentration.

Au niveau racinaire, nous observons que les concentrations des protéines totales augmentent dans les racines des plantes traitées par rapport à celle des racines des plantes témoins. En effet l'exposition des plantes aux concentrations 75 et 100  $\mu\text{M}$  de l'aluminium a provoqué une augmentation de la synthèse des protéines d'environ 30 % par rapport aux racines témoins.

Dans les conditions de cultures utilisées, l'exposition au l'aluminium semble donc modifier la teneur en protéines totales, ce qui suggère qu'il ya une forte synthèse de protéines de réponse au stress au profil d'autres protéines de synthèse.

concentrations	Témoin	C1	C2	C3	C4
Feuilles	3.18	4.13	5.17	8.3	11.59
Racines	3.09	4.18	6.31	6.72	11.65

**Tableau 18 :** Effet du l'aluminium sur la teneur en protéines solubles totales (en  $\mu\text{g. g}^{-1}$  matière fraîche) des parties aériennes et des racines.



**Figure 19 :** Effet du l'aluminium sur la teneur en protéines solubles totales (en  $\mu\text{g. g}^{-1}$  matière fraîche) des parties aériennes et des racines.

#### 2.4.L'effet du l'aluminium sur la teneur en Malondialdéhyde (MDA) :

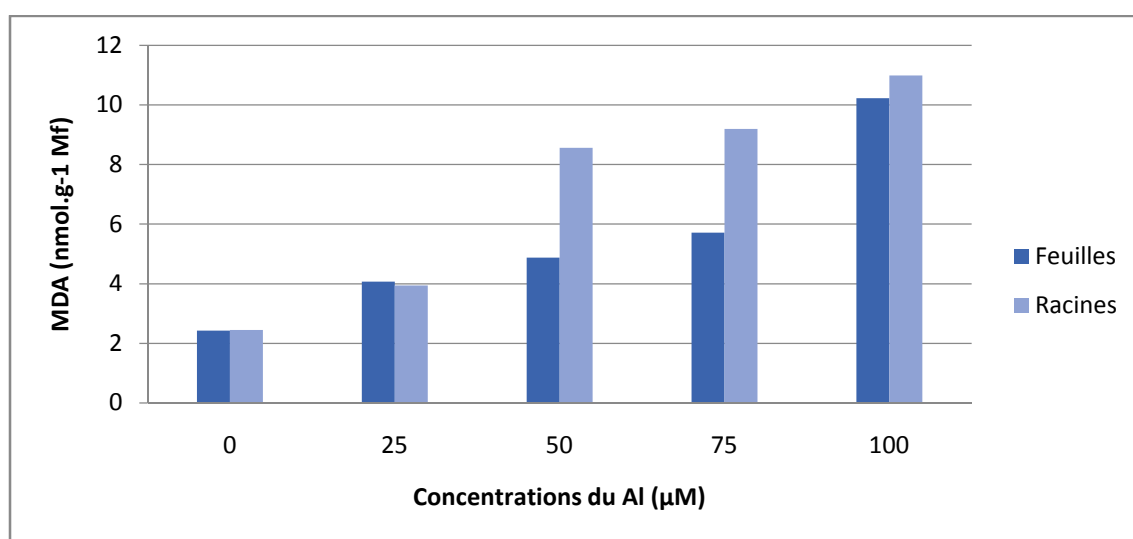
Les concentrations en Malondialdéhyde (MDA) issues de la dégradation des acides gras polyinsaturés de la membrane plasmique sont déterminées en utilisant l'acide thiobarbuturique (TBA).

La **figure 20** met en évidence l'effet du l'aluminium sur la synthèse du MDA dans les feuilles et des racines de la plante de l'orge (*Hordeum vulgare*).

Les résultats obtenus révèlent clairement que la teneur en MDA dans les feuilles augmente progressivement avec l'accentuation du stress, les concentrations du MDA dans le témoin est de l'ordre de 2.43 nmol. g<sup>-1</sup> MF, alors qu'elles atteignant 10.23 nmol g<sup>-1</sup> MF dans les feuilles des plantes traitées par 100 µM de l'aluminium, Au niveau racinaire, l'exposition au l'aluminium sa diffère du 2.45 nmol g<sup>-1</sup> de concentration de MDA dans les témoins vers 10.99 nmol g<sup>-1</sup> de MDA dans les plantes qui a subi une concentration de 100 µM.

concentrations	témoin	C1	C2	C3	C4
<b>Feuilles</b>	2.43	4.07	4.88	5.71	10.23
<b>Racines</b>	2.45	3.94	8.56	9.2	10.99

**Tableau 19:** Effet du l'aluminium sur la teneur en MDA au niveau des feuilles et des racines.



**Figure 20 :** Effet du l'aluminium sur la teneur en MDA au niveau des feuilles et des racines.

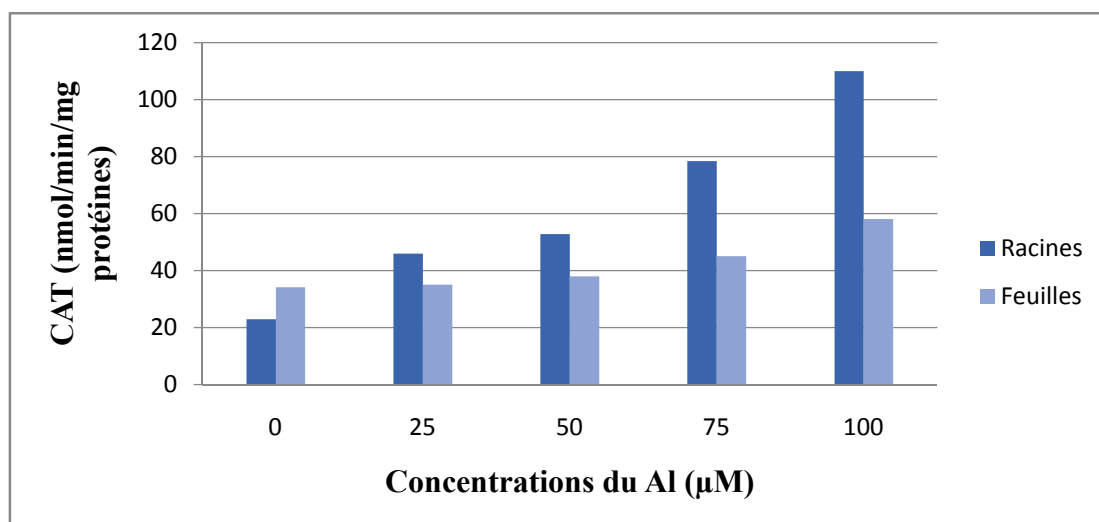
## 2.5.L'effet du l'aluminium sur les enzymes antioxydants :

### 2.5.1. L'effet du l'aluminium sur le taux du catalase :

Selon la **figure 21**, il en ressort que comparativement au témoin, l'aluminium influe sur le taux d'enzyme de la catalase dans les racines des plantes intoxiquées, causant une augmentation proportionnelles avec l'accentuation de la dose en l'aluminium à 50 ; 75 ; 100 µM (52,81 ; 87,44 ; 110 nmol/min/mg prot) respectivement par rapport au témoin (22,87 nmol/min/mg protéines).

Dans les feuilles, nous notons une augmentation légère chez les lots traités, l'accumulation de l'activité catalase s'est produite à la concentration de 100 µM de l'aluminium avec (58,14 nmol/min/mg prot) par rapport au témoin (34,18nmol/min/mg prot).



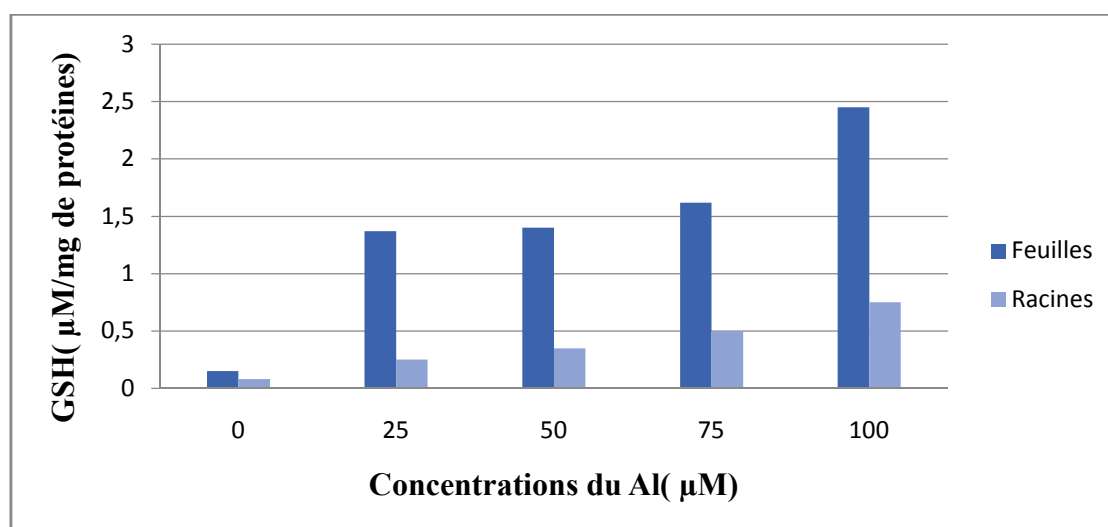


**Figure 21 :** Effet de l'aluminium sur l'activité catalase au niveau des feuilles et des racines.

### 2.5.2. L'effet de l'aluminium sur le contenu du glutathion:

La **figure 22** montre les variations du taux de l'enzyme de glutathion (GSH) au niveau des feuilles et des racines des plantes de l'orge (*Hordeum vulgare*) en fonction de la concentration de l'aluminium. En effet, la concentration de glutathion passe de 0,15  $\mu\text{M}/\text{mg}$  de protéines chez les feuilles témoins à 2,45  $\mu\text{M}/\text{mg}$  de protéines chez les feuilles par la plus forte concentration de l'aluminium (100  $\mu\text{M}$ ).

Dans les racines, les doses utilisées de l'aluminium a entraîné une légère augmentation du contenu de GSH.



**Figure 22:** Effet de l'aluminium sur le contenu du glutathion au niveau des feuilles et des racines.

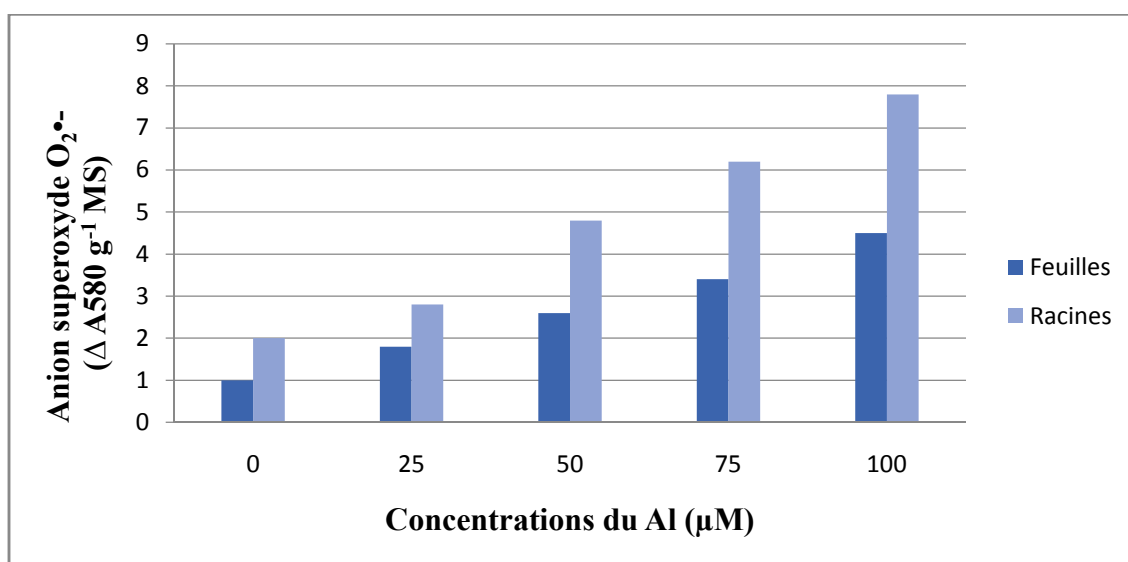
### 2.5.3. L'effet du l'aluminium sur la synthèse de l'anion superoxyde ( $O_2^{\bullet-}$ ) :

La **figure 23** met en évidence l'effet du l'aluminium sur la synthèse de l'anion superoxyde au niveau des feuilles et des racines des plantes de l'orge.

Au niveau foliaire, nous constatons que la production de l'anion superoxyde augmente d'une manière très hautement significative au niveau des feuilles des lots traités par rapport aux lots témoins.

L'aluminium provoque également une augmentation très hautement significative de la production de l'anion superoxyde au niveau des racines des plantes traitées par rapport à celle des témoins.

Nous notons que la stimulation de la synthèse de l'anion superoxyde est plus importante au niveau des racines qu'au niveau des plantes de l'orge.



**Figure 23:** Effet du l'aluminium sur la production de l'anion superoxyde au niveau des feuilles et des racines.

# Chapitre 5 : discussion

**Discussion :**

Pour notre étude, les doses du métal choisi sont en fonction de la réalité environnementale c'est à dire proche des concentrations pouvant de rencontrer dans les sols pollués par des activités anthropiques. Dans ce contexte, nous nous proposons une discussion générale des principaux résultats obtenus par notre travail.

Le développement des plantes traverse plusieurs phases de croissance allant des graines (germination) à la graine (récolte). Ces phases sont bien distinctes du point morphologique. A cet effet, nous distinguons chez les céréales : la levée, le tallage, la montaison, la floraison, etc.

Dans ce travail, nous nous sommes fixé à étudier l'impact du l'aluminium sur uniquement la période de germination et une durée de la croissance.

L'exposition des plantes aux métaux lourds peut entraîner de nombreux troubles physiologiques et biochimiques. L'inhibition de la croissance des plantes peut être considérée comme une réponse générale associée à la toxicité des métaux lourds (**Kopyra et Gwóz'dz', 2003**).

Nos résultats montrent que l'aluminium réduit l'élongation des racines et des feuilles des plantes d'orge. Ceci a été démontré par de divers travaux (**Wang et al., 2006 ; Silva et al., 2012 ; Abate et al., 2013**). On a trouvé que les racines sont plus sensibles aux métaux lourds, parce qu'elles sont les premiers organes touchés par la contamination, viennent ensuite les feuilles (**Grant et al., 1998 ; Mossor-Pietraszewska, 2001**).

Les concentrations des pigments photosynthétiques sont souvent mesurées pour évaluer l'impact de nombreux stress environnement. Selon nos résultats, L'aluminium induit un abaissement des concentrations en chlorophylles (a, b et a+b). Ceci s'accorde avec de nombreux travaux qui rapportent une réduction de la concentration en chlorophylle sous l'effet du l'aluminium (**Reich et al., 1994 ; Li et al., 2012 ; Silva et al., 2012**) et des métaux lourds en général (**Kupper et al., 1996**). La toxicité du l'aluminium altère le processus photosynthétique, en affectant la fixation du CO<sub>2</sub>, le transport des électrons, la phosphorylation ainsi que les activités des enzymes de fixation du carbone (**CLIJSTERS et VAN ASSCHE, 1985; Li et al., 2012 ; Silva et al., 2012**).

L'exposition aux métaux lourds se traduit souvent par une synthèse de divers métabolites qui s'accumulent dans la plante. Parmi lesquelles figurent les sucres solubles. On a trouvé une

augmentation graduelle dans le contenu en sucres solubles chez les feuilles que chez les racines. Ceci s'accorde avec de nombreux travaux qui rapportent une augmentation des concentrations des sucres solubles sous l'effet de l'aluminium chez les plantes d'*Oryza sativa* (Mishra et al., 2008), et de d'autres métaux lourds comme le plomb chez *Chlorella vulgaris* (Bajguz, 2011). Les sucres solubles sont, de façon directe ou indirect, fortement liés à l'équilibre cellulaire du ROS, ainsi qu'aux métabolismes antioxydants (Couée et al., 2006).

Le traitement par l'aluminium a également induit une augmentation des concentrations des protéines totales dans les feuilles et les racines. Cette accumulation des protéines est due à l'effet des ROS, ce qui fait partie de la stratégie moléculaire de la tolérance contre le stress (Mishra et al., 2006 ; Yang et al., 2015). Le contact des protéines avec les ROS altèrent les molécules de signalisations en modifiant l'expression de certains gènes et en modulant la synthèse de nouvelles protéines de stress spécifiques (Verma et al., 2003).

La surproduction des ROS cause une peroxydation des lipides qui conduit à la formation de produits de dégradations tels que les alcanes et des aldéhydes (MDA) (Ferra et al., 2003). Le Malondialdéhyde (MDA) considéré comme étant un des principaux produits finaux du processus de la peroxydation lipidique ; la détermination de ses concentrations est utilisé comme un outil fiable pour détecter la peroxydation lipidique (Yadav, 2010). Ainsi, nos résultats ont montré que l'aluminium a provoqué une augmentation de la concentration du MDA au niveau des feuilles et des racines. En outre, Nous avons remarqué selon nos résultats que les concentrations du MDA au niveau des racines sont plus importantes qu'au niveau des feuilles. Ceci peut témoigner de l'installation d'un stress oxydant au niveau de la partie racinaire des plantes (Ma, 2007 ; Corrales et al., 2008 ; Poschenrieder et al., 2008).

Lors du stress important, la génération initiale d'ERO peut conduire à un cycle délétère de production de ces espèces toxiques pour l'organisme. Ce cycle de production d'ERO mitochondriale est notamment considéré comme l'une des causes principales du vieillissement cellulaires (Loeb et al., 2005).

Dans ce travail, nos résultats ont montré une importante production des ROS dans les feuilles et dans les racines. Les défenses anti-oxydantes des végétaux comprennent plusieurs enzymes et molécules antioxydants. Parmi ces enzymes, la catalase, localisée au niveau des peroxysomes et des mitochondries, le glutathion est localisée dans plusieurs compartiments cellulaires tels que les chloroplastes, le cytosol, les peroxysomes et les membranes plasmiques (Jiménez et al., 1997).

Dans notre étude, nous avons évalué l'effet du l'aluminium sur les enzymes antioxydants (CAT) et enzymes non enzymatique (GSH) et aussi la superoxyde-dismutase (SOD). Nos résultats ont mis en évidence une augmentation de l'activité catalase chez lots traités, cette augmentation des concentrations du catalase au niveau des racines est proportionnelle avec l'augmentation des concentrations du l'aluminium. Plusieurs travaux ont montré qu'il ya une relation proportionnelle entre l'augmentation du taux de l'activité de la catalase et l'élévation de la concentration des métaux lourds comme l'aluminium **(Ali et al., 2011)**.

En outre, une augmentation de l'activité du GSH est induite dans les feuilles chez les plantes traitées par l'aluminium. Ceci, met bien en évidence le rôle important joué par ce tri peptide dans la détoxification des métaux en les chélatant directement. Il joue également un rôle fondamental dans la régulation du statut redox des cellules et dans la neutralisation des ROS. Le glutathion pourrait constituer la première ligne de défense des plantes contre la flambée oxydative générée par l'aluminium **(Mishra et al., 2006 ; Corrales et al., 2008)**.

Dans notre étude, nous avons constaté que l'aluminium induit une augmentation significative de la production de l'anion superoxyde ( $O_2^{\cdot -}$ ) au niveau des racines et des feuilles des plantes traitées par rapport aux témoins. Ceci peut être du à la toxicité du aluminium qui génère les espèces réactives de l'oxygène (ROS) provoquant un stress oxydatif dans les différents tissus des plantes. L'augmentation de la production de l'anion superoxyde ( $O_2^{\cdot -}$ ) a été observée chez de nombreuses espèces exposées aux métaux lourds tels que l'aluminium **(Ribeiro et al., 2012)**.

# Conclusion et perspectives

## Conclusion et perspectives :

A travers ce travail, nous avons pu recueillir des données intéressantes concernant la physiologie de *Hordeum vulgare* confronté à différentes concentrations en l'aluminium et sur certains mécanismes conduisant à sa phytotoxicité, par l'investigation du rôle joué par les espèces réactives de l'oxygène (ERO) à travers l'étude des enzymes du stress oxydant.

Ceci, nous a permis d'avoir une connaissance partielle sur l'adaptation et la vulnérabilité de cette espèce étudiée vis-à-vis que contrainte métallique.

En effet, les résultats obtenus à l'issue de ce travail, montre que :

Le stress causé par l'aluminium, engendre des désordres dans la croissance des plantes d'orge étudiées. Ces altérations se manifestent par une réduction de l'élongation racinaire et foliaire et une réduction des biomasses fraîches. Ces altérations sont plus importantes dans les racines comparées aux feuilles des plantes d'orge traitées par les différentes concentrations d'aluminium. Le système racinaire semble être plus affecté par le stress métallique.

Les excès du l'aluminium à provoqué une réduction des concentrations des pigments photosynthétiques, une augmentation de la biosynthèse des protéines totales et une synthèse importantes des sucres solubles. Cette augmentation semble jouer un rôle important dans la détoxification et la protection des constituants cellulaires contre l'aluminium.

Les mesures de la stabilité de la membrane cellulaire et la fuite des électrolytes ont été largement utilisés pour étudier les effets du stress sur les plantes. L'accumulation des ces ions métalliques dans les pantes d'orge semble provoquer une altération de la membrane plasmique à travers l'attaque des acides gras polyinsaturés. En effet nous avons enregistré une importante accumulation de Malondialdéhyde dans les feuilles et les racines. Cette peroxydation lipidique membranaire semble être due aux effets indirects du l'aluminium par les radicaux libres qu'ils engendrent.

En ce qui concerne les activités enzymatiques anti oxydantes, Nos résultats ont montré que l'aluminium à la concentration de 100  $\mu\text{M}$  provoque une augmentation du catalase et glutathion (GSH) dans les racines et les feuilles. Nous notons également selon nos résultats, une augmentation très hautement significative de la production de l'anion superoxyde au niveau des racines des plantes traitées.



Ces données montrent que la variété de l'orge (*Hordeum vulgare*) étudiée présente une certaine défense vis-à-vis du l'aluminium par l'intervention des molécules osmorégulatrices et des enzymes antioxydants.

Les données de la littérature donnent des résultats qui ne sont pas toujours révélés facile à exploiter dans la mesure où de nombreux paramètres varient d'une publication à l'autre. Il serait donc intéressant de mener une étude sur plusieurs variétés afin de pouvoir comparer les réponses des plantes et rapporter une modification claire au niveau de sensibilité/ tolérance des variétés en présence du l'aluminium.

Par la suite, d'autres perspectives préciseront la localisation de l'accumulation des métaux pour savoir notamment si le compartiment pariétal stocke davantage de métal que le compartiment intracellulaire.

Si les résultats obtenus avec l'orge (*Hordeum vulgare*) à l'échelle de laboratoire donnent des résultats satisfaisant. Un suivi des plantes en serre cultivées sur des sols pollués sera nécessaire pour se rapprocher davantage des conditions naturelles.

# Références bibliographiques

## Références bibliographiques

### A

**Arnon, D. I. (1949).** Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta Vulgaris*. *Plant Physiology*, 24(1), p. 1-16.

**Aebi, H., (1984).** [13] Catalase in vitro. *Methods in Enzymology*, Vol.105, P. 121-126.

**AFSSAPS. (2011).** Évaluation du risque lié à l'utilisation de l'aluminium dans les produits cosmétiques, AFSSAPS, PP. 44.

**Ali, S., Bai, P., Zeng, F., Cai, S., Shamsi, I.H., Qiu, B., Wu, F., & Zhang, G., (2011).** The ecotoxicological and interactive effects of chromium and aluminum on growth, oxidative damage and antioxidant enzymes on two barley genotypes differing in Al tolerance. *Environmental and Experimental Botany*, 70, P. 185–191.

**ARNICH, N., SIROT, V., RIVIERE, G., JEAN, J., NOEL, L., LEBLANC, J.-C., & GUERIN, T., (2012).** Dietary exposure to trace elements and health risk assessment in the 2nd French Total Diet Study. *Food and Chemical Toxicology*, Vol. 50, P. 2432-2449.

**AOUMEUR, H. (2012).** *L'effet stressant du plomb sur la croissance du radis « Raphanus sativus L. » Réponses physiologiques, biochimiques et efficacité potentielle de phytoremédiation* (Thèse de Magister en sciences de l'Environnement et Climatologie). UNIVERSITE d'Oran ES-SENIA. P50-52.

**Abate, E., Hussien, S., Laing, M., & Mengistu, F., (2013).** Aluminium toxicity tolerance in cereals: Mechanisms, genetic control and breeding methods. *African Journal of Agricultural Research*, Vol.8(9), PP.711-722.

**ALAYAT, A. (2015).** *Etude de l'impact Toxicologique de Certains Agents Chimiques sur la Qualité des Céréales : cas du Blé et de l'orge* (THESE DE DOCTORAT EN BIOLOGIE). Université «BADJI MOKHTAR-ANNABA», ANNABA. P11-12.

**ASEF. (2017, 27 Avril).** L'aluminium, ce métal qui nous empoisonne : la synthèse de l'Asef. Repéré à <https://www.asef-asso.fr/production/laluminium-ce-metal-qui-nous-empoisonne-la-synthese-de-lasef/>

### B

**BIEGO, G.H., JOYEUX, M., HARTEMANN, P., & DEBRY, G., (1998).** Daily intake of essential minerals and metallic micropollutants from foods in France. *The Science of the Total Environment*, Vol. 217, P 27-36.

**Benabdeljelil, K. (1999).** Valorisation des Orges en Aviculture. *Transfert de Technologie en Agriculture*, (55), 1- 4.

**BOUHANIA, R., ZEHRI, S. (2004).** *Etude comparative de deux types d'engrais phosphatés sur céréales à pailles (orge) dans la région d'Oued Righ (Station El-Arfiane)* (Mémoire D'Ingénieur d'Etat en Agronomie Saharienne). UNIVERSITE DE OUARGLA, OUARGLA. P17-18.

**Bajguz, A. (2011).** Suppression of *Chlorella vulgaris* Growth by Cadmium, Lead, and Copper Stress and Its Restoration by Endogenous Brassinolide. *Arch Environ Contam Toxicol*, 60, P. 406-416.

**BOUCHELAGHEM, S. (2012).** *Contribution à l'étude de l'impact d'un engrais couramment utilisé en Algérie (NPK) sur la croissance, le métabolisme et le développement racinaire d'un modèle végétal : blé dur (Triticum durum Desf)* (THESE DE DOCTORAT EN BIOLOGIE). Université «BADJI MOKHTAR-ANNABA», ANNABA. P48.

**BOUNGAB, K. (2013).** *La rayure réticulée de l'orge (Hordeum vulgare L.) dans le Nord-Ouest Algérien : importance, morphologie et pouvoir pathogène chez Pyrenophora teres f. teres et recherche de moyens de lutte* (These de DOCTORAT). UNIVERSITE d'Oran.

**BABIN Julien. (2016).** *Les adjuvants vaccinaux : Étude de la balance bénéfice / risque Illustration par la myofasciite à macrophages et la survenue de narcolepsie post-vaccination par PANDEMRIX®* (Thèse de DOCTORAT EN PHARMACIE). UNIVERSITE DE POITIERS. P36.

**Bojórquez-Quintal, E., Escalante-Magaña, C., Echevarría-Machado, I., & Martínez-Estévez, M., (2017).** Aluminum, a Friend or Foe of Higher Plants in Acid Soils. *Front Plant Sci*, V. 8:1767.

## C

**CLIJSTERS, H., VAN ASSCHE, F., (1985).** Inhibition of photosynthesis by heavy metals. *Photosynthesis Research*, 7(1), 31-40.

**CUNAT, L. (1999).** *Biodisponibilité de l'aluminium dans l'intestin. Etudes in vitro et in vivo chez le rat* (THESE DE DOCTORAT EN TOXICOLOGIE DE L'ENVIRONNEMENT). UNIVERSITE DE METZ, France. P 37-38.

**Chen, J., Wang, M., Ruan, D., & She, J., (2002).** Early chronic aluminium exposure impairs long-term potentiation and depression to the rat dentate gyrus in vivo. *Neuroscience*, 112(4), P. 879-887.

**Claire Gourier-Fréry., Nadine Fréry., Claudine Berr., Sylvaine Cordier., Robert Garnier., Hubert Isnard., Coralie Ravault., Claude Renaudeau., (2004).** *Aluminium Quels risques pour la santé?*-Synthèse des études épidémiologiques. France : InVS.

**Colomina, M. T., Roig, J. L., Torrente, M., Vicens, P., & Domingo, J. L., (2005).** Concurrent exposure to aluminum and stress during pregnancy in rats: Effects on postnatal development and behavior of the offspring. *Neurotoxicology and Teratology*, 27 (4), P.565-574.

**Couée, I., Sulmon, C., Gouesbet, G., & El Amrani, A., (2006).** Involvement of soluble sugars in reactive oxygen species balance and responses to oxidative stress in plants. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 57(3), PP. 449-459.

**Corrales, I., Poschenrieder, C., & Barcelo', J., (2008).** Boron-induced amelioration of aluminium toxicity in a monocot and a dicot species. *Journal of Plant Physiology*, 165(5), 504-513.

**Cabernet. (2013, 24 Mars).** *Les médecins alertent l'UE (qui ne bouge pas) sur les dangers des faibles doses d'aluminium dans le corps.* Repéré à <http://forum.terre-net.fr/topic-260277>

**Christelle Merlo. (2014).** *Utilisation des adjuvants dans les vaccins : état des lieux et actualités* (THESE DE DOCTORAT EN PHARMACIE). UNIVERSITE TOULOUSE III PAUL SABATIER, France. P64.

**CHARRIERE Marie-Anne. (2018).** *REALITE DES RISQUES LIES AUX ADJUVANTS VACCINAUX : EXEMPLE DES MALADIES AUTO-IMMUNES* (Thèse de DOCTORAT EN PHARMACIE). UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON 1. P47.

## D

**Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F., (1956).** Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), PP. 350-356.

**DeVoto, E., Yokel, R. A., (1994).** The Biological Speciation and Toxicokinetics of Aluminum. *Environmental Health Perspectives*, 102(11), 940-951.

**Djermoun, A. (2009).** La production céréalière en Algérie : les principales caractéristiques. Nature et Technologie, *Revue Nature et Technologie*, (01), 45-53.

**DOUICHENE, S. (2016).** *Effets d'un traitement antioxydant sur l'intoxication chronique à l'Aluminium « Etude expérimentale chez la souris »* (THESE DE DOCTORAT EN SCIENCES AGRONOMIQUES). Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem. P6-7.

**E**

- EARNSHAW, A., GREENWOOD, N.N. (1997).** *Chemistry of the Elements*. Elsevier.
- Exley, C., Siesjö, P., & Eriksson, H., (2010).** The immunobiology of aluminium adjuvants: how do they really work?. *Trends in Immunology*, 31(3), P. 103-109.
- Exley, C. (2013).** Human exposure to aluminium. *Environ. Sci.: Process. Impacts*, 15(10), 1807-1816. DOI: 10.1039/c3em00374d

**F**

- Flarend, R., Bin, T., Elmore, D., & Hem, S.L., (2001).** A preliminary study of the dermal absorption of aluminium from antiperspirants using aluminium-26. *Food and Chemical Toxicology*, 39(2), 163-168.
- Ferrat, L., Pergent-Martini, C., & Roméo, M., (2003).** Assessment of the use of biomarkers in aquatic plants for the evaluation of environmental quality: application to seagrasses. *Aquatic Toxicology*, 65(2), 187-204.
- Ferreira, P. C., Piai, K. A., Takayanagui, A. M. M., & Segura-Muñoz, S. I., (2008).** Aluminum as a risk factor for Alzheimer's disease. *Revista Latino-Americana de Enfermagem*, 16(1), 151-157.
- FAO STAT. (2018).** Top 10 Country Production of Orge 2018. Repéré à [http://www.fao.org/faostat/fr/#rankings/countries\\_by\\_commodity](http://www.fao.org/faostat/fr/#rankings/countries_by_commodity)
- FAO-STAT. (2019).** CÉRÉALES. Dans OCDE, *PERSPECTIVES AGRICOLES DE L'OCDE ET DE LA FAO 2019-2028* (PP.135-153). Repéré à [http://www.fao.org/3/CA4076FR/CA4076FR\\_chapitre3\\_Cereales.pdf](http://www.fao.org/3/CA4076FR/CA4076FR_chapitre3_Cereales.pdf)

**G**

- Gallais, A., Bannerot, H. (1992).** *Amélioration des espèces végétales cultivées. Objectifs et critères de sélection*. Paris. Ed : INRA. P768.
- Golub, M. S., Han, B., Keen, C.L., & Eric Gershwin, M., (1993).** Developmental patterns of aluminum in mouse brain and effects of dietary aluminum excess on manganese deficiency. *Toxicology*, 81(1), P. 33-47.
- Guillard, O., Huguet, F., Fauconneau, B., Piriou, A., & Pineau, A., (1996).** Absence of Gastrointestinal Absorption or Urinary Excretion of Aluminium from an Allantoinate Complex Contained in Two Antacid Formulations in Patients with Normal Renal Function. *Eur J Clin Chem Clin Biochem*, 34, P.609-612.

**Grant, C. A., Buckley, W. T., Bailey, L.D., & Selles, F., (1998).** Cadmium accumulation in crops. *Canadian Journal of Plant Science*, 78(1), P. 1-17.

**Golub, M. S., Germann, S. L., (2000).** Long-term consequences of developmental aluminum (Al) in mice. *Neurotoxicology and Teratology*, 22(3), P. 460.

**GUIGA, W. (2006).** *Identification des inhibiteurs de la germination de l'orge et Mise au point d'un procédé de traitement des eaux de trempé en malterie en vue de leur recyclage* (Thèse de DOCTORAT en Procédés Biotechnologiques et Alimentaires). INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE.

**Grangeot-Keros, L. (2016).** Les adjuvants aluminiques : le point en 2016. *Journal de pédiatrie et de puériculture*, 29 (4), 215-235. Doi : 10.1016/j.jpp.2016.04.009

## H

**HALLAB, A., RAHMOUNI, A. (2016).** *Croisement intra spécifique de quelques variétés d'orge (Hordeum vulgare L.)* (THESE DE DOCTORAT). UNINERSITE Mohamed BOUDIAF de Msila. Repéré à <http://dspace.univ-msila.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/7915/3.%20M%C3%A9moire.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

## I

**INRAA. (2006).** Rapport national sur l'état des ressources phytogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture, Deuxième rapport national sur l'état des ressources phytogénétiques, 67 P.

**INERIS. (2014).** Données technico-économiques sur les substances chimiques en France : Aluminium, *DRC-14-136881-07004A*, 75 P. <http://www.ineris.fr/substances/fr/> ou <http://rsde.ineris.fr/>

## J

**Jiménez, A., Hernández, J. A., de1 Rio, L. A., & Sevilla, F., (1997).** Evidence for the Presence of the Ascorbate-Glutathione Cycle in Mitochondria and Peroxisomes of Pea (*Pisum sativum L*) Leaves. *Plant Physiol*, 114, P. 275-284.

**Jean-Charles Leblanc., Thierry Guérin., Philippe Verger., Jean-Luc Volatier., (2004).** *Etude de l'alimentation totale française : mycotoxines, minéraux et éléments traces*. France. Ed : INRA. P 68.

**Jean-Luc RUNAVOT. (2011).** *Maltage à faible hydratation : dégradation des structures pariétales, diffusion et modification des protéines aleuroniques et caractérisation des barrières hydrophobes cuticulaires* (Thèse de DOCTORAT en Biochimie). UNIVERSITÉ DE NANTES.

**Jargot, D., La Rocca, B., Marc, F., Nikolova-Pavageau, N., Pilière, F., Robert, S., Sallé, B., Serre, P., & Simonnard, A., (2014).** Aluminium et ses composés minéraux. Fiche toxicologique n°306, INRS, 16 P. Repéré à [www.inrs.fr/fichetox](http://www.inrs.fr/fichetox)

## **K**

**Kaur, J., Duffus, C., (1989).** The effect of naf on cereal seed germination and seeding growth. *Plant Cell and environnement*, 12, P 154-161.

**Kupper, H., Kupper, F., & Spiller, M., (1996).** Environmental relevance of heavy metal-substituted chlorophylls using the example of water plants. *Journal of Experimental Botany*, 47(295), 259-266.

**Kopyra, M., Gwóz'dz', E. A., (2003).** Nitric oxide stimulates seed germination and counteracts the inhibitory effect of heavy metals and salinity on root growth of *Lupinus luteus*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 41, P. 1011-1017.

**KOLAI, T. (2008).** *CLIMAT ET DYSFONCTIONNEMENT DES AGRO-SYSTEMES CEREALIER CAS DES WILAYAS SETIF, BORDJ BOU ARREIRIDJ ET MILA* (Thèse de Magister Sciences Agronomiques). Institut National Agronomique El Harrach- Alger.

**Kubis, J. (2008).** Exogenous spermidine differentially alters activities of some scavenging system enzymes, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and superoxide radical levels in water-stressed cucumber leaves. *Journal of Plant Physiology*, 165 (2008), 397-406.

**Kamal-Eldin, A., Lærke, H. N., Knudsen, K-E. B., Lampi, A. M., Piironen, V., Adlercreutz, H., Katina, K., Poutanen, K., & Aman, P., (2009).** Physical, microscopic and chemical characterisation of industrial rye and wheat brans from the Nordic countries. *Food and Nutrition Research*, (53), 1-11

**KELLIL, H. (2010).** *Contribution à l'étude du complexe entomologique des céréales dans la région des hautes plaines de l'Est algérien* (Thèse Magister). UNIVERSITE EL HADJ LAKHDAR-BATNA. P21.

**Klein, J. P., Mold, M., Mery, L., Cottier, M., & Exley C., (2014).** Aluminum content of human semen: Implications for semen quality. *Reproductive Toxicology*, Vol. 50, P. 43-48.



**KOUADRIA, R. (2019).** *Contribution des champignons endophytes à la tolérance aux facteurs adverses (biotiques et abiotiques) des espèces cultivées : isolement des champignons endophytes et étude de leur contribution à la tolérance à la salinité ou à des polluants* (Thèse de DOCTORAT en Sciences Agronomiques). UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS DE MOSTAGANEM.

## **L**

**Lauwerys, R.R., Hoet, P. (2001).** *Industrial chemical exposure: Guidelines for biological monitoring*. 3rd Ed. Lewis publishers. 638P.

**Loeb, L. A., Wallace, D. C., Martin, G. M., (2005).** The mitochondrial theory of aging and its relationship to reactive oxygen species damage and somatic mtDNA mutations. *Proceedings of the national academy of sciences*, 102(52), 18769-18770.

**L'Abbé Coste. (2011).** Description de Coste : (*Hordeum vulgare L.*). Projet de numérisation de la flore de L'Abbé Coste par le réseau Tela botanica, *eFlore L'encyclopédie botanique collaborative*. Repéré à <https://www.tela-botanica.org/bdtfx-nm-34916-description>

**Li, Z., Xing, F., & Xing, D., (2012).** Characterization of Target Site of Aluminum Phytotoxicity in Photosynthetic Electron Transport by Fluorescence Techniques in Tobacco Leaves. *Plant Cell Physiol*, 53(7), P. 1295-1309.

## **M**

**Mossor-Pietraszewska, T. (2001).** Effect of aluminium on plant growth and metabolism. *Acta Biochimica Polonica*, 48(3), P. 673-686.

**Mishra, S., Srivastava, S., Tripathi, R.D., Govindarajan, R., Kuriakose, S.V., & Prasad, M.N.V., (2006).** Phytochelatin synthesis and response of antioxidants during cadmium stress in *Bacopa monnieri L.* *Plant Physiology and Biochemistry*, 44(1), 25-37.

**MOSSAB, M. (2007).** *Contribution à l'étude de l'exploitation à double fin de l'orge HORDEUM VULGARE L. en zones semi-arides d'altitude* (Thèse de Magister en Sciences Techniques de Production Végétale). Institut National Agronomique El Harrach- Alger.

**Ma, J. F. (2007).** Syndrome of Aluminum Toxicity and Diversity of Aluminum Resistance in Higher Plants. *International Review of Cytology*, 264, P. 225-252.

**Mishra, P., Dubey, R. S., (2008).** Effect of aluminium on metabolism of starch and sugars in growing rice seedlings. *Acta Physiol Plant*, 30(3), 265-275.

**MOSTEFAOUI, S. (2011).** *MECANISMES LIES A L'ADAPTATION ET A LA PRODUCTIVITE DE L'ORGE (Hordeum vulgare L.) DANS LES ENVIRONNEMENTS DIFFICILES* (Etudes Supérieures en Biologie (DES)). UNIVERSITE DE M'SILA. P6.

**Maherou, J., Norest, S., & Ferrer, L., (2014, 20 février).** L'aluminium, ce métal qui nous empoisonne. Repéré à [https://www.deridet.com/L-aluminium-ce-metal-qui-nous-empoisonne\\_a3557.html](https://www.deridet.com/L-aluminium-ce-metal-qui-nous-empoisonne_a3557.html)

**MAERTENS-WILCZYNSKI Stéphanie. (2015).** *Problématique des pathologies neurodégénératives en médecine du travail : Enquête auprès de 470 médecins* (Thèse de DOCTORAT EN MEDECINE). UNIVERSITE LILLE 2 DROIT ET SANTE. P17.

## O

**OULAD LMAROUDI El Mehdi. (2016).** *LES COSMETIQUES ET LES DERIVES D'ALUMINIUM : ENQUETE AUPRES D'UNE GRANDE SURFACE COMMERCIALE A KENITRA* (Thèse de DOCTORAT EN PHARMACIE). UNIVERSITE MOHAMMED V DE RABAT. P19.

## P

**Poschenrieder, C., Gunsé, B., Corrales, I., & Barceló, J., (2008).** A glance into aluminum toxicity and resistance in plants. *Science of the Total Environment*, 400(1-3), 356-358.

**PILETTE Jean. (2009).** *Aluminium et Vaccins.* (Préface de Michel GEORGET). France : Dangles.

**Pineau, A., Guillard, O., Fauconneau, B., Favreau, F., Marty, M-H., Gaudin, A., Vincent, C. M., Marraud, A., & Marty, J-P., (2012).** In vitro study of percutaneous absorption of aluminum from antiperspirants through human skin in the Franz™ diffusion cell. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 110, 21–26.

**Peer Schilperoord, Alvanu. (2013).** *Plantes cultivées en Suisse – L'orge.* (Relecture pour la version allemande : Eveline Dudda, Hinterforst ; Traduction en français : Daniel Gilliéron, Chengdu). Alvanu : Verein für alpine Kulturpflanzen. P41.

## R

**Ranki, H., Sopanen, T., (1984).** Secretion of alpha-amylase by the aleurone layer and the scutellum of germinating barley grain. *Plant Physiology*, 75(3), 710-5.

**Reich, P. B., Oleksyn, J., Tjoelker, M. G., (1994).** Relationship of aluminum and calcium to net CO<sub>2</sub> exchange among diverse scots pine provenances under pollution stress in Poland.

*Oecologia*, 97, P. 82-92.

**Ronneberg, A., Haldorsen, T., Romundstad, P., & Andersen, A., (1999).** Occupational exposure and cancer incidence among workers from an aluminum smelter in western Norway. *Scand J Work Environ Health*, 25(3), P. 207-214.

**RAHAL-BOUZIANE, H. (2006).** *CARACTÉRISATION AGRO MORPHOLOGIQUE DES ORGES (HORDEUM VULGARE L.) CULTIVEES DANS LES OASIS DE LA REGION D'ADRAR (ALGERIE)* (Thèse de Magister en sciences Agronomiques). INSTITUT NATIONAL D'AGRONOMIE.

**Ribeiro, C., Cambraia, J., Peixoto, P.H.P., & Fonseca Júnior, É. M. da., (2012).** Antioxidant system response induced by aluminum in two rice cultivars. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 24(2), 107-116.

## S

**Schroeder, J. C., Tolbert, P. E., Eisen, E. A., Monson, R. R., Hallock, M.F., Smith, T.J., Woskie, S.R., Hammond, S.K., & Milton, D.K., (1997).** Mortality studies of machining fluid exposure in the automobile industry IV: a case- control study of lung cancer. *American Journal of Industrial Medicine*, 31(5), P. 525-533.

**Servais, P., Anzil, A., Gatel, D., & Cavard, J., (2004).** Biofilm in the Parisian suburbs drinking water distribution system. *Journal of Water Supply :Research and Technology-Aqua*, 53(5), 313-324.

**Sharma, P., Mishra, K.P., (2006).** Aluminum-induced maternal and developmental toxicity and oxidative stress in rat brain: Response to combined administration of Tiron and glutathione. *Reproductive Toxicology*, 21(3), P. 313-321.

**Schulte, D., Close, T.J., Graner, A., Langridge, P., Matsumoto, T., Muehlbauer, G., Sato, K., Schulman, A.H., Waugh, R., Wise, R.P., & Stein, N., (2009).** The International Barley Sequencing Consortium—At the Threshold of Efficient Access to the Barley Genome. *Plant Physiology*, Vol. 149, pp. 142–147.

**Silva, S., Pinto, G., Dias, M. C., Correia, C. M., Moutinho-Pereira, J., Pinto-Carnide, O., & Santos, C., (2012).** Aluminium long-term stress differently affects photosynthesis in rye genotypes. *Plant Physiology and Biochemistry*, 54, P. 105-112.

**Shaw, C. A., Tomljenovic, L., (2013).** Aluminum in the central nervous system (CNS): toxicity in humans and animals, vaccine adjuvants, and autoimmunity. *Immunol Res*, 56, 304-316.

**SONTHONNAX Julien. (2014).** *L'aluminium et son potentiel toxique* (THESE DE DOCTORAT EN PHARMACIE). UNIVERSITE DE LIMOGES, France. P26-29.

## T

**Thériault, G., De Guire, L., & Cordier, S., (1981).** Reducing aluminum: an occupation possibly associated with bladder cancer. *CMA JOURNAL*, 124(4), P. 419-422.

**TAIBI, W. (2014).** *CONTRIBUTION A L'ANALYSE GENETIQUE ET CARACTERISATION DE QUELQUES VARIETES D'ORGE ET L'INFLUENCE DE L'ENVIRONNEMENT SUR LEURS RENDEMENTS AU NIVEAU DE LA WILAYA DE TLEMCEM* (Thèse de Magister en agronomie). UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAIDE-TLEMCEM. P 4-7.

**TAÏR KADDOUR. (2017).** *Recherche et évaluation des effets cytoprotecteurs de l'extrait aqueux d'Arthrophytum « Hammada scoparia » chez les rats exposés à l'Aluminium* (Thèse de DOCTORAT EN BIOCHIMIE) .UNIVERSITE ORAN-1- Ahmed Ben Bella. P 5-7.

## V

**Verma, S., Dubey, R. S., (2003).** Lead toxicity induces lipid peroxidation and alters the activities of antioxidant enzymes in growing rice plants. *Plant science*, 164, P. 645-655.

**VIRGINIE, B. (2010).** *Quand l'aluminium nous empoisonne*. Paris : Max Milo.

## W

**Wang, M., Chen, J-T., Ruan, D-Y., & Xu, Y-Z., (2002).** The influence of developmental period of aluminum exposure on synaptic plasticity in the adult rat dentate gyrus in vivo. *Neuroscience*, Vol. 113(2), P.411-419.

**WANG, J., RAMAN, H., ZHANG, G., MENDHAM, N., & ZHOU, M., (2006).** Aluminium tolerance in barley (*Hordeum vulgare L.*): physiological mechanisms, genetics and screening methods. *Journal of Zhejiang University SCIENCE B*, 7(10), 769-787. Doi:10.1631/jzus.2006.B0769

## Y

**Yanai, J., Zhao, F.-J., McGrath, S.P., & Kosaki, T., (2006).** Effect of soil characteristics on Cd uptake by the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Environmental Pollution*, 139(1), 167-175. Doi:10.1016/j.envpol.2005.03.013

**Yadav, S. K., (2010).** Cold stress tolerance mechanisms in plants. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30(3), 515-527.

**Yang, M., Tan, L., Xu, Y., Zhao, Y., Cheng, F., Ye, S., & Jiang, W., (2015).** Effect of Low pH and Aluminum Toxicity on the Photosynthetic Characteristics of Different Fast-Growing Eucalyptus Vegetatively Propagated Clones. *PLOS ONE*, 10(6), 1-15.

## **Z**

**Zhang, X., Long, Y., Huang, J., & Xia, J. (2019).** Molecular Mechanisms for Coping with Al Toxicity in Plants. *Int. J. Mol. Sci*, 20(7), 1551. Doi:10.3390/ijms20071551