

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الجيلالي بونعامة خميس مليانة

Université de Djilali BOUNAAMA KHEMIS MILIANA



**Faculté des Sciences et de la Technologie**

**Département de la Technologie**

**Mémoire de fin d'étude :**

En vue de l'obtention d'un diplôme de

**Master en « Génie des Procédés pharmaceutiques »**

Option : « Génie pharmaceutique »

**Thème :**

**Etude comparative de l'influence du séchage sur la valeur nutritionnelle de deux graines oléagineuses, graines de Lin et de soja (*Linum usitatissimum* et *Glycine max*).**

**Devant le jury composé de :**

**Examineur M. HAMIDI.**

**Examinatrice : L.HADJ KHELIFA.**

**Encadreur: B.MEKHANEG .**

**Présenté par :**

- M<sup>elle</sup> Khelifi Zineb
- M<sup>elle</sup> Sellam Manel

**Année universitaire : 2019/202**

## *Dédicace*

*"Que dieu soit loué, celui qui nous a appris ce que nous ne savions pas"*

*Tout d'abord ce travail doit être dédié à mes chers parents, ceux qui m'ont donné les plus belles choses dans cette vie.*

*J'ai l'honneur de dédier mon travail à ma famille, petit et grand :*

*A mes sœurs et mon frère;Chahinez, Ilham et Taki-ellah.*

*Aussi qu'à ma binette Manel qui m'appris qui est ce qu'un travail collectif, aussi à toute sa famille.*

*A mes grands pères.*

*A mes tantes; Fatiha, Khadîdja, zaghla et chère Akila (la grande et la petite), Samia, Salima, Hamida, zhor, Ratiba...*

*A mes oncle; Abdelkader, Youcef, Ahmed, Abdou, Mohamed, Idrisse et Nouredine.*

*A toutes mes cousins petit et grand ;*

*Malak,Salima,Ahlam, Hanane, Meriem, Fatima, Amal, Sabrina, Yasmin, Rim, Ahmed, Khalil, khaled, Ismail....*

*A toute la famille Khelifi*

*A mon promoteur Benyoucef MEKHANEG.*

*Aux sœurs de mon cœur ;*

*Fella, Wardia, Chaima.*

*A toutes mes copines;*

*Taous, Abir, Asma, Bouthaina, Dounia, Chiraz, Touness, Soumia, Maria, Bouchra et Halla.*

*Et à tous ceux qui me soutiennent avec ses prières.*

*... Zineb.*

## *Dédicace*

*Tout d'abord, on remercie Dieu, le Généreux qui a enseigné à l'homme ce qu'il ne savait pas  
et aussi de nous avoir donné la force afin d'accomplir ce travail.*

*A ma chère mère qui n'a jamais cessé de m'apporter tout ce dont j'ai besoin pour réaliser ce  
travail et tout au long de mon parcours éducatif, ainsi que sa tendresse  
et sa compréhension. Merci Mama;*

*A mon très cher père qui a toujours peiné pour me créer les conditions nécessaires pour bien  
réussir dans mes études.*

*Je t'aime toujours papa ;*

*A mes chères sœurs Assma, Ahlem, Ikram, Hiba*

*A mes chères neveux Iyade ,AnaiDjana*

*A mon fiancé Abdellah et à toute sa famille*

*A ma chère grand-mère et à toute famille*

*A ma belle et chère Zineb et toute sa famille*

*A mes tantes Saida, Malika, Yamina, Baya, Aicha, Zoubida*

*A mes chères cousines : maissa, firouz, imane*

*A toutes mes amis : Chérifa, Nidal, Fatima ,Meryeme , Assma, Sihame, abir, Tounes, Ikram et  
à toute la promotion de Génie pharmaceutique*

*Je tiens à exprimer ma gratitude à mon promoteur Mr Benyoucef MEKHANEG*

*pour son aide,*

*...Manel*

## *Remerciement*

*Nous remercions d'abord notre créateur **Allah**, Grand et Miséricordieux, le tout puissant pour le courage qu'il nous a donné pour mener ce travail à terme.*

*Et puis nos parents qui nous ont encouragées «qu'**Allah** les protège».*

*Nous exprimons nos profondes reconnaissances et nos vifs remerciements à Mr. **B.MEKHANEĞ** qui nous ont honorés en acceptant de diriger ce travail, pour ses encouragements, ses conseils. Monsieur, nous ne pouvons que sincèrement vous exprimer notre respect et notre gratitude.*

*Nous tenons à remercier tous les membres de jury **M.HAMIDI** et **L.HADJ KHELIFA** qui ont accepté de juger notre projet.*

*Nous remercions aussi notre chers enseignants Mr **O.LARBIBOUAMRANE**, Melle **F.RAHMANI** et Melle **S.BOUDERGUA** ceux qui ont travaillé dur pour nous amener à ce stade.*

*Nos profondes reconnaissances s'adressent à tous les enseignants de la faculté des sciences et de la technologie.*

*Nos sincères remerciements à tous ceux qui ont participé à la réussite de ce travail.*

*.....**Merci** à tous !!!*

## Résumé

### ملخص

الهدف من عملنا هو الدراسة المقارنة للأعمال السابقة المتعلقة بتأثير التجفيف على القيمة الغذائية للبذور الزيتية ، في هذه الحالة فول الصويا و بذور الكتان.

تتميز البذور الزيتية بمحتواها العالي من الزيت. بحيث تحتوي البذرتان اللتان تمت دراستهما على أكثر من 15 و 33% من دهون على التوالي.

الأحماض الدهنية الأساسية طويلة السلسلة لبذور الكتان تزايدت عند طاقة ميكروويف 300 واط ، بنسبة 54.99% و 55.59% لحمض اللينولينيك وحمض اللينوليك على التوالي ، على العكس بالنسبة لفول الصويا ، يتم الحصول على حمض اللينوليك عند قوة 300 واط بقيمة 41.72% ، بينما يتم الحصول على القيمة القصوى عند 100 واط لحمض اللينولينيك بقيمة 22.92%.

يتم الحصول على نسبة عالية من البروتين لبذور الكتان عند قوة الميكروويف 100 واط ، بقيمة 17.66% على العكس بالنسبة لفول الصويا ، ارتفع معدل البروتين عند قوة 180 واط ، بتركيز بروتين 44 مجم / مل.

أظهرت دراستنا تأثير القوة المطبقة أثناء التجفيف بالميكروويف على أعداد الأحماض مما يؤدي إلى تدهور معين لمكونات الزيت.

**الكلمات المفتاحية:** بذور الزيت ، بذور الكتان ، فول الصويا ، القيمة الغذائية ، التجفيف بالميكروويف و الأحماض الدهنية.

### Résumé

L'objectif de notre travail est l'étude comparative des travaux antérieurs, relatifs à l'influence du séchage sur la valeur nutritionnelle des graines oléagineuses, en l'occurrence grains de Lin (*Linum usitatissimum*) et de Soja (*Glycine max*).

Les graines oléagineuses sont caractérisées par leur richesse en huile. En effet, les deux graines étudiées contiennent respectivement plus de 15 et 33% de lipides.

Les acides gras essentielles à longues chaînes pour les grains de Lin, sont élevés à une puissance de micro-onde de 300 W, avec 54.99% et 55.59% pour l'acide linoléique (C18 :3) et linoléique C18 :2 respectivement, par contre pour les grains de Soja, l'acide linoléique (C18 :2) est obtenu à une puissance de 300W avec une valeur de 41.72%, alors que la valeur maximal est obtenue à 100 w pour l'acide linoléique C18 :3 avec une valeur de 22.92%.

Le taux protéique élevé pour les grains de Lin, est obtenu à puissance de micro-onde de 100 w, avec une valeur de 17.66%. Par contre pour les grains de Soja, le taux en protéines élevé à la puissance de 180w, avec une concentration de 44 mg/ml en protéines.

## Résumé

---

Notre étude nous a montré l'impact de la puissance appliquée lors de séchage par micro-ondes sur les indices d'acide qui conduit à une certaine dégradation des constituants des deux huiles.

**Mots clés :** graines oléagineuses, graines de lin, graines de soja, *Linum usitatissimum*, *Glycine max*, valeur nutritionnelle, séchage par micro-onde et acides gras.

### Abstract

The objective of our work is the comparative study of the previous works, relating to the influence of drying on the nutritional value of oilseeds, in this case flax seeds (*Linum usitatissimum*) and Soya beans (*Glycine max*).

Oilseeds are characterized by their high oil content. Indeed, the two seeds studied contain respectively more than 15 and 33% of lipids.

The essential fatty acids with long chains for Linseed, are elevated at a microwave power of 300 W, with 54.99% and 55.59% for linolenic acid C18:3 and linoleic acid C18:2 respectively, on the other hand for Soya beans, linoleic acid C18:2 is obtained at a power of 300W with a value of 41.72%, while the maximum value is obtained at 100 w for linolenic acid C18:3 with a value of 22.92%.

The high protein content for Linseed is obtained at a microwave power of 100 w, with a value of 17.66%. On the other hand for Soya beans, the high protein content is obtained at a power of 180 w, with a protein concentration of 44 mg/ml.

Our study showed us the impact of the power applied during microwave drying on the acid indices which leads to a certain degradation of the constituents of both oils.

**Key words:** oilseeds, linseeds, soybeans, *Linum usitatissimum*, *Glycine max*, nutritional value, microwave drying and fatty acids.

## Abréviations

---

- **ADN** : l'acide désoxyribonuléique.
- **ARN** : l'acide ribonucléique.
- **BBI** : inhibiteur de Bowman-Birk.
- **FAO** : organisation des nations unis pour l'alimentation et l'agriculture (Food and agriculture organization of the united nations).
- **LDL** : lipoprotéine.
- **KI** : inhibiteur de Kunitz.
- **OMS** : organisation mondiale de la santé.
- **SDG** : Sécoisolariciresinol Di Glucoside

## Nomenclature

---

- $A_w$  : activité de l'eau.
- **cm** : centimètre.
- **C20 :0** : Acide arachidique.
- **C20 :1**: Acide béhenique.
- **C18 :2**: Acides linoléiques.
- **C18 :3** : Acide linoléique.
- **C14 :0** : Acide myristique.
- **C16 :0** : Acide palmitique.
- **C16 :1**: Acide palmitoleique.
- **C18 :1**: Acide oléique.
- **C18 :0** : Acide stéarique.
- **D** : Diamètre.
- **H** : Hauteur.
- **HR** : humidité relative.
- $m_e$  : masse de l'eau.
- $m_s$  : masse de solide (produit).
- **m** : mètre.
- **mm** : millimètre
- $P_a$  : pression atmosphérique
- $P_v$  : pression de vapeur d'eau.
- $P_e$  : pression partielle en vapeur d'eau.
- $P_t$  : pression totale ambiante.
- $T_h$  : température de bulbe humide.
- **t** : tonne.
- $V_{hum}$  : volume humide.
- **X** : teneur en eau base sèche.
- $X_{bh}$  : teneur en eau base humide.
- $X_{lim}$  : teneur en eau limite.
- **Y** : humidité absolue.
- $\rho_a$  : masse volumique.

## Liste des figures

---

<b>Figure I.1.</b> Détail d'un relevé de fresque par Cailliaud.....	<b>03</b>
<b>Figure I.2.</b> Planche botanique de <i>Linum usitatissimum</i> .....	<b>05</b>
<b>Figure I.3.</b> Usine de soja .....	<b>06</b>
<b>Figure I.4.</b> Culture de lin en champs.....	<b>09</b>
<b>Figure I.5.</b> Culture de soja dans le monde.....	<b>10</b>
<b>Figure II.1.</b> Formule chimique des tocophérols (structure R, R, R).....	<b>18</b>
<b>Figure II.2.</b> Structures chimiques du SécoisolariciresinolDiGlucoside (SDG) (molécule 1), de l'acide glucopyranosyl-p-coumarique ; R=H et de l'acide glucopyranosylfêrulique ; R = OCH <sub>3</sub> (molécule 2),et de l'oligomère composé de SDG et d'acide 3-hydroxy-3-méthylglutarique (molécule 3).....	<b>19</b>
<b>Figure III.1.</b> Diagramme de l'air humide.....	<b>30</b>
<b>Figure III.2.</b> Forme type d'isotherme de sorption-désorption d'un produit .....	<b>34</b>
<b>Figure III.3.</b> Courbes de cinétique de séchage présentant les 3 phases de séchage.....	<b>35</b>
<b>Figure III.4.</b> Schématisation des différents composants du four à micro-ondes .....	<b>37</b>
<b>Figure IV.1.</b> Diagramme représente la teneur en eau des graines de lin ( <i>Linum usitatissimum</i> ) après le séchage.....	<b>40</b>
<b>Figure IV.2.</b> Diagramme représente la teneur en eau des graines de soja ( <i>Glycine max</i> ) à base sèche.....	<b>41</b>
<b>Figure IV.3.</b> Diagramme représente la teneur en eau des graines de soja ( <i>Glycine max</i> ) à base humide.....	<b>41</b>
<b>Figure IV.4.</b> Rendement en huile de lin ( <i>Linum usitatissimum</i> ) après le séchage par micro-onde.....	<b>42</b>
<b>Figure IV.5.</b> Rendement en huile extrait par Soxhlet pour le soja ( <i>Glycine max</i> ).....	<b>43</b>
<b>Figure IV.6.</b> Composition en acide gras de l'huile de soja ( <i>Glycine max</i> ).....	<b>48</b>

## Liste des tableaux

---

<b>Tableau I.1.</b> Classification taxinomique du <i>L. Usitatissimum</i> .....	<b>07</b>
<b>Tableau I.2.</b> Classification taxonomique de Glycine max .....	<b>08</b>
<b>Tableau I.3.</b> Production en tonnes de graines de lin. Chiffres 2010 données de FAO ...	<b>11</b>
<b>Tableau I.4.</b> Principaux producteurs de soja dans le monde.....	<b>12</b>
<b>Tableau II.1.</b> Composition en acides gras de l'huile de lin .....	<b>16</b>
<b>Tableau II.2.</b> Répartition en acides gras de différents types de lin .....	<b>17</b>
<b>Tableau II.3.</b> Composition nutritionnelle de la graine de soja (en pourcentage du poids total de la graine).....	<b>20</b>
<b>Tableau II.4.</b> Répartition en acides gras de différents types de lin.....	<b>22</b>
<b>Tableau IV.1.</b> Taux d'humidité de graines de lin ( <i>Linum usitatissimum</i> ) séchées par micro-onde.....	<b>39</b>
<b>Tableau IV.2.</b> Humidité des graines de soja ( <i>Glycine max</i> ) à 105 °C.....	<b>39</b>
<b>Tableau IV.3.</b> Paramètres physico-chimiques d'huile des graines de lin séchées par micro-onde.....	<b>44</b>
<b>Tableau IV.4.</b> Propriétés physico-chimiques d'huile de soja ( <i>Glycine max</i> ).....	<b>44</b>
<b>Tableau IV.5.</b> Analyse des acides gras de l'huile de lin ( <i>Linum usitatissimum</i> ) par CPG..	<b>46</b>
<b>Tableau IV.6.</b> Composition moyenne en acide gras de l'huile de Soja ( <i>Glycine max</i> ).....	<b>47</b>
<b>Tableau IV.7.</b> Taux des protéines des graines de lin après avant et après le séchage.....	<b>48</b>
<b>Tableau IV.8.</b> Taux de protéine dans le soja ( <i>Glycine max</i> ).....	<b>49</b>

<b>Dédicaces.</b>
<b>Remerciement.</b>
<b>Résumé.</b>
<b>Abréviations.</b>
<b>Nomenclatures.</b>
<b>Liste des figures.</b>
<b>Liste des tableaux.</b>

## **Table des matières**

---

<b>Introduction Générale.....</b>	<b>01</b>
<b>Chapitre I. Généralités sur lin et soja</b>	
I.1. Introduction.....	03
I.2. Historique .....	03
I.3. Description botanique.....	04
I.4. Classification taxonomique .....	06
I.5. Culture .....	08
I.6. Production mondiale.....	11
I.7. Variétés.....	12
I.8. Utilisations.....	13
I.9. Domaine médical.....	14
<b>Chapitre II. La valeur nutritionnelle</b>	
II.1. Composition biochimique de lin.....	16
II.1.1. l'huile de lin.....	16
II.1.2. Protéines.....	17
II.1.3. Composés glucidiques .....	17
II.1.4. Composés antioxydants du lin.....	18
II.2. Composition biochimique du soja.....	19
II.2.1. Facteurs antinutritionnels et effet de la cuisson.....	20
II.2.2. Protéines .....	21
II.2.3. Lipides .....	21
II.2.4. Glucides .....	22
II.2.5. Vitamines et minéraux .....	22

## Sommaire

---

II.2.6.Tocophérols .....	24
II.2.7.Saponines.....	24
II.2.8.Phytostérols.....	25
II.2.9.Phytates.....	25
II.2.10.Inhibiteurs de protéases .....	26
II.2.11.Lunasine .....	26
II.2.12.Phytoestrogènes, les isoflavones de soja.....	26

### Chapitre III. Séchage

III.1. Généralités.....	28
III.2. Définition.....	28
III.3. Principe du séchage.....	28
III.4. Objectifs du séchage.....	28
III.5. Caractéristiques de l'air humide.....	29
III.6.Principes physiques du séchage.....	29
III.7. Modes de séchage.....	31
III.8. Description du produit humide.....	32
III.9. Cinétique et phases de séchage.....	34
III.10. Séchage par micro-ondes.....	35
III.11. Phénomènes se produisant au cours du séchage.....	38

### Chapitre IV.Résultats et discussion

IV.1. Introduction.....	39
IV.2. Taux d'humidité.....	39
IV.3. L'extraction des huiles.....	42
IV.4.Analyse de chromatographique des acides gras.....	45
IV.5. Détermination du taux protéiques.....	48
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>50</b>

### Références bibliographiques.

# Introduction générale

### Introduction générale

Le terme «oléagineux» désigne un ensemble de produits agricoles qui, une fois transformés ou triturés, donnent des huiles qui sont recherchées sur tous les marchés mondiaux. La demande de produits à base d'oléagineux se répartit entre la consommation humaine (principalement les huiles pour friture et assaisonnement) et l'alimentation animale (tourteaux) [1].

La famille des oléagineux désigne des plantes dont les graines ou les fruits sont riches en lipides et dont la culture permet de produire des huiles à usages alimentaires et/ou industriels. De nos jours, ce marché regroupe une très large variété d'espèces. Il existe en effet une centaine de plantes permettant de produire des corps gras. Cependant, seules 9 d'entre elles (palme, coco, cacao, colza, tournesol, lin, ricin, soja et olive) représentent aujourd'hui plus de 95% de la production mondiale. Le développement d'une filière en particulier repose sur des choix stratégiques, étroitement liés aux caractéristiques de la culture concernée, ainsi qu'à sa composition et à l'extractibilité de son huile. En fonction de ces différentes propriétés, l'extraction de l'huile peut avoir un intérêt limité ou se révéler industriellement très rentable [2].

Les oléagineux renferment de nombreux atouts pour la santé. Les graisses qu'ils contiennent sont des acides gras insaturés (bonnes graisses) dont les Oméga3. Or, ils sont bénéfiques pour le système cardiovasculaire. Pauvres en sucres, ils apportent les fibres indispensables au transit ainsi que de la vitamine E (antioxydant) et des minéraux [3].

Dans une proportion moindre que les produits animaliers, les oléagineux contiennent aussi leur part de protéines. De moins bonne qualité, elles sont dites « incomplètes » car il leur manque certains acides aminés essentiels pour avoir une valeur biologique similaire à celle des viandes, des poissons, œufs et autres produits laitiers [3].

Les graines récoltées peuvent avoir des propriétés très différentes (taille, structure, dureté, composition en acides gras...) et se distinguent notamment par leur teneur en huile. Ce paramètre définit en grande partie le procédé d'extraction qui sera employé. Les graines à faible teneur en huile, comme le soja et le coton (environ 20 %), subissent généralement une simple extraction par solvant. Au contraire, pour les graines plus riches en huile, telles que le colza (40 %), le tournesol (40 %) et le lin (35 %) l'extraction se fait en deux étapes : un pressage mécanique suivi d'une extraction par solvant [2].

Le meilleur moyen permettant de réduire l'humidité dans les graines est de passer par le processus de séchage. En effet, le séchage comme moyen de conservation de nombreux produits se réalise dans des séchoirs utilisant, la vapeur, l'air-chaud, le rayonnement etc...Ainsi plusieurs modes de séchage sont utilisés industriellement pour conserver les produits. Ces modes dépendent en général de la nature la matière ou du produit à sécher et du taux d'humidité recherché par l'opération de séchage [4].

Le présent travail de mémoire de fin d'étude a pour objectif :

Etude des lipides, protéines et des acides gras des deux graines oléagineuses (graines de lin et de soja).

Etude comparative de la valeur nutritionnelle avant et après le séchage par micro-onde pour déterminer la puissance de séchage favorable pour la préservation de la valeur nutritionnelle des grains.

Etude qualitative et quantitative des acides gras et des protéines des deux graines oléagineuses (graines de lin et de soja) avant et après séchage par micro-onde.

Dans ce contexte, notre travail est divisé en deux parties:

Une partie relative à la synthèse bibliographique, subdivisée en trois chapitres. Dans le premier chapitre où on trouve une généralité sur les plantes des deux graines de lin et de soja. Dans le deuxième, nous avons revu tout ce qui concerne la valeur nutritionnelle de ces deux graines. Enfin un troisième chapitre dont lequel les différents modes du séchage et ces mécanismes sont décrits.

La partie expérimentale ne contient qu'un seul chapitre, dans lequel nous avons rassemblé les différents résultats antérieurs avec une discussion approfondie.

Enfin une conclusion générale résumant les principaux résultats et commentaires de cette modeste étude.

# Chapitre I

### Chapitre I. Généralités sur lin et soja.

#### I.1. Introduction

Les graines oléagineuses sont caractérisées par leur grande richesse en huile. En effet, les graines de soja et de lin contiennent respectivement en moyenne 15 et 33 % de matières grasses. Cette richesse en énergie est associée à des teneurs relativement importantes en protéines d'où leur appellation d'oléo-protéagineux [5].

#### I.2. Historique

##### I.2.1. Lin (*Linum usitatissimum*)

Le lin, plante de la famille des Linacées, fut l'une des premières plantes cultivées par l'Homme. Des traces de son existence datant de - 8000 ans avant J.C. ont ainsi été découvertes dans des cités lacustres suisses. Néanmoins son origine (probablement des hauts plateaux d'Asie) n'est pas connue. Son utilisation a été étendue par l'Égypte des pharaons où les momies étaient entourées de bandelettes de lin. De plus, des fresques retrouvées dans les pyramides illustrent la culture du lin [6].



**Figure I.1.** Détail d'un relevé de fresque par Cailliaud [6].

##### I.2.2. Soja (*Glycine max*)

On pense généralement que le soja est originaire de Chine, il y a 4000-5000 ans. La première mention écrite de cette plante est contenue dans le livre « **Materia Medica** » du chinois « EMPEROR SHEN NONG », vers 2838 avant J.C., qui décrit les plantes de Chine (Morse 1950, Anonyme 1933) [7].

Le soja (*Glycine max*) a été introduit en Europe vers 1700 [8] et aux États-Unis vers 1765. La date de son arrivée en Afrique n'est pas précise, mais il semble avoir été introduit au 19<sup>ème</sup> siècle par les commerçants chinois le long de la côte Est [9].

### I.3. Description botanique

#### I.3.1. Lin (*Linum usitatissimum*)

Le Lin est une plante élancée et gracieuse qui pousse dans toutes les régions à climat tempéré de l'Europe méridionale et d'Asie du sud-ouest [10].

##### a) Botanique :

*Linum usitatissimum* se présente sous l'aspect d'une tige unique pouvant atteindre une hauteur [H] voisine de 1 m pour un diamètre [D] au collet de l'ordre de 2 mm. Sur cette tige se répartissent 80 à 100 feuilles simples, lancéolées, sessiles, possédant 3 nervures. La disposition de celles-ci est spiralée ; elle forme 3 hélices à partir de la 3<sup>ème</sup> feuille, les deux premières ayant une disposition opposée alterné par rapport aux cotylédons. Pour trouver deux feuilles successives sur une même génératrice, il convient de faire 3 tours de tige et de compter 8 insertions foliaires. L'intervalle qui les sépare correspond à la distance interfoliaire. Elle détermine la longueur maximale des fibres élémentaires.

Le lin possède une racine pivotante pouvant descendre à plus de 1 mètre de profondeur dans les terres profondes et émettant de nombreuses radicelles.

L'inflorescence en forme de cyme porte de nombreuses fleurs dont la couleur varie d'un bleu pur jusqu'à un blanc plus ou moins rosé, selon les variétés. La floraison étagée peut durer jusqu'à 15 jours. Les fleurs comptent 5 pétales et ont une durée de vie brève (une journée). Le pollen demeure viable pendant 5 à 7 heures seulement, depuis la déhiscence des anthères jusqu'à celles des pétales.

Chaque fleur donne un fruit : une capsule à 5 loges contenant chacune deux graines et séparées par une fausse cloison plus ou moins ciliée. Ces capsules présentent une légère pointe au sommet. À maturité, les capsules sont plus ou moins déhiscentes selon les variétés [11].

##### b) Graine de lin :

Les graines sont lisses, plates, oblongues, petites et légères (entre 4 et 7 grammes les mille grains) et de couleur brune à maturité. Elles se terminent par un bec légèrement recourbé.

La graine de lin est riche en huile ; celle-ci représente 35 à 50 % de sa masse sèche. L'acide linoléique (oméga 3) peut représenter 55 à 75 % des acides gras qui composent cette huile [11].



**Figure I.2.** Planche botanique de *Linum usitatissimum* (A – vue générale de la plante, 1 – implantation des pétales dans le bouton, 2 – sépale, 3 – pétale, 4 – fleur sans sépales ni pétales, 5 – étamines, 6 – coupe longitudinale de 4, 7 – coupe transversale de l’ovaire, 8 – capsule, 9 – capsule ouverte, 10 - graine, 11 – coupe longitudinale de la graine)[6].

### I.3.2. Soja (*Glycine max*)

Le Soja est une plante herbacée annuelle à croissance rapide, originaire d’Asie mais actuellement cultivée dans le monde entier.

#### a) Botanique :

*Glycine max* est une plante légumineuse érigée, pouvant atteindre 1 m de haut. Sa racine pivotante peut atteindre 2 m de profondeur dans de bonnes conditions de sol, les racines secondaires explorant les 15 à 20 cm supérieurs du sol. Les racines portent des nodules résultant d’une infection par *Bradyrhizobium japonicum* (dans la plupart des cas).

Les feuilles sont trifoliées et les folioles sont ovales à lancéolées, le plus souvent larges chez les cultivars commerciaux.

Les fleurs papilionacées sont blanches, roses, violettes ou bleuâtres, avec une corolle de 5 à 7 mm de long.

Les fruits sont des gousses à deux ou trois graines contenant des graines jaunes et arrondies dont le hile est de couleur jaune à noire [12].

### b) Graine de soja :

Le soja est principalement une graine oléagineuse contenant environ 20 % d'huile [12].

La graine de soja est de forme presque sphérique, sont généralement jaune, certaines variétés sont noires, brunes ou vertes. Elles ont un hile noir, brun ou jaune [13].



**Figure I.3.**Usine de soja [13].

## I.4. Classification taxonomique

### I.4.1. Lin (*Linum usitatissimum*)

Le *Linum usitatissimum*, plante herbacée annuelle, fait partie des quelque 230 espèces de la famille des Linacées, qui se divise en environ 14 genres. Le genre *Linum* comprend près des deux tiers des espèces de la famille des Linacées. Malgré la diversité remarquable de cette famille, le *L. usitatissimum* en est la seule espèce cultivée [14].

**Tableau I.1.** Classification taxinomique du *L. Usitatissimum* [14].

Règne	Végétal
Sous- règne	Trachéophytes (plantes vasculaires)
Super-embranchement	Spermatophytes (plantes à graines)
Embranchement	Magnoliophytes (plantes à fleurs)
Classe	Magnolioopsides (dicotylédones)
Sous-classe	Rosidées
Ordre	Linales
Famille	Linacées
Genre	<i>Linum</i> L.
Espèce	<i>Linum usitatissimum</i> L.

### I.4.2. Soja (*Glycine max*)

Le soja, nommé soya au Canada (***Glycine max***), est une espèce de plante annuelle de la famille des légumineuses (Fabaceae), originaire d'Asie orientale.

Le soja cultivé *Glycine max* a accumulé une diversité génétique prodigieuse depuis sa domestication. Il en existe de nombreuses variétés, se différenciant notamment par le port, la couleur des graines, la période de floraison [15].

**Tableau I.2.** Classification taxonomique de *Glycine max* [15].

<b>Règne</b>	Plantae
<b>Sous-règne</b>	Tracheobionta
<b>Division</b>	Magnoliophyta
<b>Classe</b>	Magnoliopsida
<b>Sous-classe</b>	Rosidae
<b>Ordre</b>	Fabales
<b>Famille</b>	Fabaceae
<b>Sous-famille</b>	Faboideae
<b>Tribu</b>	Phaseoleae
<b>Sous-tribu</b>	Glycininae
<b>Genre</b>	<i>Glycine</i>
<b>Sous-genre</b>	Soja

### I.5. Culture

#### I.5.1. Lin (*Linum usitatissimum*)

Avant toute chose, il faut savoir que le lin a besoin d'un climat tempéré et humide pour pousser de manière optimale. La médaille du 1<sup>er</sup> pays producteur revient à la France avec 95 000 Tonnes de lin produit.

Il est nécessaire pour obtenir un lin de qualité d'effectuer une rotation des cultures. C'est ainsi que les liniculteurs respectent une rotation de 6 ans entre chaque culture de lin. Cela permet également de nettoyer et purifier les sols en empêchant certains parasites de s'y installer.



**Figure I.4.** Culture de lin en champs [16].

**1. Du semis à la croissance:** Les semis du lin ont lieu généralement entre le 1<sup>er</sup> et le 30 avril en fonction des conditions climatiques. Les graines sont alors semées à travers les champs, on comptera entre 1500 et 1600 pousses par mètre carré. C'est cette densité qui permet de garder le meilleur rapport entre le rendement et à la qualité des fibres.

**La plante met une centaine de jour à atteindre la levée.** C'est à cet instant que le lin est le plus vulnérable aux caprices de mère nature. Elle pourra monter à une hauteur de 1,20m et développer des racines jusqu'à 1,5m de profondeur.

**2. La floraison:** Les fleurs de lin ne sont qu'éphémères, lors de la floraison, **leur durée de vie n'excède pas quelques heures.** La floraison a lieu généralement aux alentours de mi-juin, les champs de lin acquiert alors une magique couleur bleutée. C'est à cette étape que les fibres de lin atteignent leur taille maximale.

**3. L'arrachage:** C'est durant cette phase que les liniculteurs arrachent les fibres de lin de la terre. **Il est préférable d'arracher plutôt que de couper** pour ainsi préserver au mieux les fibres présentes dans la partie basse des tiges. On commence l'arrachage des plantes 5 semaines après la floraison donc durant le mois de juillet. Le lin est prêt à être arraché quand on distingue le jaunissement sur toute la tige et la chute des feuilles sur le tiers de celle-ci. Une fois les tiges arrachées, elles sont ensuite déposées en andain sur le sol.

**4. Le rouissage:** Le rouissage se déroule de juillet à Septembre, **il a pour objectif de faciliter l'extraction des fibres de la plante.** C'est avec l'alternance de la pluie et du soleil que le lin va commencer à rouillir, les micro-organismes présents dans le sol vont agir sur les tiges de lin. Le liniculteur doit faire très attention de ne pas laisser trop rouillir le lin sous

peine d'avoir des fibres de trop mauvaise qualité. Il doit les laisser également suffisamment de temps pour que lin puisse être teillé par la suite. Cette étape peut durer de 2 semaines à 3 mois en fonction des conditions climatiques.

**5. Le retournage et l'enroulage:** Pour obtenir un rouissage homogène, il est nécessaire de retourner le lin. Une fois l'opération de rouissage terminée, les andains de lin sont enroulés en ballot de pailles.

Le respect de ces étapes est essentiel pour pouvoir obtenir un lin de qualité avec des fibres résistantes et soyeuses [16].

### I.5.2. Soja (Glycine max)

La plante n'est pas problématique en elle-même et a, au contraire, des caractéristiques agronomiques intéressantes. Le soja capte l'azote présent dans l'air. "Quand on récolte, on prend les gousses. Tout le reste est remis dans le sol. Pour la culture suivante, on ajoute donc moins d'azote via des engrais de synthèse"[17], C'est donc une bonne culture à introduire dans les rotations.

Le soja est semé au printemps, et récolté en septembre. C'est donc une période où il fait chaud, et la plante nécessite de l'eau. Mais elle est à mi-chemin entre le tournesol et le maïs : le soja a moins besoin d'eau que le maïs. C'est aussi une plante plus souple, car elle tolère une irrigation irrégulière ou retardée.

Enfin, "c'est un exemple de culture à bas intrants [qui nécessite, même en agriculture non biologique, peu de fertilisants et pesticides]. En agriculture conventionnelle, le traitement consiste seulement en un désherbage au début, quand la plante est petite. C'est aussi une plante particulièrement bien adaptée à la culture biologique", notamment parce que le désherbage mécanique lui convient bien [17].



**Figure I.5.** Culture de soja dans le monde [17].

### I.6. Production mondiale

#### I.6.1. Lin (*Linum usitatissimum*)

Au niveau mondial, la production du lin est réalisée principalement au Canada (1<sup>er</sup> producteur mondial), aux Etats-Unis et en Chine. Malgré une augmentation importante de la production d'oléagineux en vue de la production d'huile végétale depuis 40 ans, les surfaces de lin cultivées subissent de fortes variations interannuelles mais sans augmentation de la production. En 2006, la production française représente à peu près 1% de la production mondiale de graines oléagineuses et 2% de celle de lin [6].

Dans le monde, le lin est aussi cultivé pour sa graine qui contient environ 41 % d'huile, riche en omega-3, en particulier de l'acide gras nommé acide alpha-linolénique. L'huile de lin en contient 57 % en moyenne, ainsi que 16 % d'acide linoléique.

Du point de vue de la production mondiale, le Canada est le principal producteur et exportateur de graines de lin. La production est assez variable (entre 400 000 tonnes et 930 000 tonnes ces dernières années), et exportée pour l'essentiel [18].

**Tableau I.3.** Production en tonnes de graines de lin [18].

Pays	Production en (t)	Pourcentage
Canada	423000	22.0%
Chine	350000	18.2%
Etats-Unis d'Amérique	230030	12.0%
Fédération de Roussie	178210	9.3%
Ethiopie	150000	7.8%
Inde	146000	7.6%
Kazakhstan	94610	4.9%
Royaume-Unis	72000	3.7%
Argentine	52075	2.7%
Ukraine	46800	2.4%
France	35000	1.8%
Suède	23900	1.2%
Autres pays	220753	6.3%
Totale	1922759	100%

### I.6.2. Soja (Glycine max)

Le soja (Glycine max) a été introduit en Europe vers 1700. Cependant, en raison de la En raison des mauvaises conditions climatiques et pédologiques, la production de soja a été limitée en Europe.

En Amérique du Nord, le soja a été introduit pour la première fois au 18e siècle, mais L'introduction officielle n'a pas eu lieu avant le début des années 1900. En 1920, des milliers de nouvelles variétés ont été collectées, les moissonneuses-batteuses ont été utilisées pour la première fois pour la récolte du soja, et la première transformation du soja a été ouverte. En conséquence, la production à grande échelle avait commencé.

À l'heure actuelle, les États-Unis d'Amérique sont devenus le leader mondial de production du soja. En 1999, 71 milliards de kg de soja ont été produits aux États-Unis, soit 46 % de la production totale du marché mondial. Les autres pays à forte production de soja sont le Brésil (20 %), l'Argentine (14 %) et la Chine (9 %). En 1999, les principaux importateurs de soja complet étaient l'Europe et le Japon [8].

**Tableau I.4.** Principaux producteurs de soja dans le monde [19].

Pays	Production en millions de tonnes
Brésil	83.5
Etats unis	82.1
Argentine	51
Chine	12.6
Inde	11.5
Canada	4.9
Autres	15.2
Totales	209.8

### I.7. Variétés

#### I.7.1. Lin (*Linum usitatissimum*)

Il existe deux types de culture de lin oléagineux : Le lin d'hiver tolérant au froid et ne nécessitant pas de vernalisation et le lin de printemps.

Selon les régions, le semis du lin d'hiver est généralement réalisé de mi-septembre à fin-octobre et la récolte de début juillet à mi-août. Le lin de printemps est semé de fin-février à fin-mars et récolté de mi-juillet à début-septembre.

La date d'ouverture du bilan prévisionnel est la reprise de végétation à la sortie de l'hiver pour le lin d'hiver et le semis pour le lin de printemps. Dans les deux cas le bilan se clôture à la fin d'absorption de l'azote (2 à 3 semaines avant la récolte). Les apports de fertilisation azotée sont réalisés à la reprise de végétation sur le lin d'hiver (de début février à fin février selon les régions) et principalement au moment du semis sur le lin de printemps (1er février dans le calendrier national zone vulnérable) [20].

### I.7.2. Soja (*Glycine max*)

Il existe plus de 200 variétés de soja. Mis à part la maturité et le rendement, la sélection des variétés sur la base de la résistance ou de tolérance aux maladies, d'autres graines de soja de spécialité comprennent les variétés à faible teneur en acide gras saturés, riche en isoflavones, haute teneur en saccharose, en acide oléique, en stéarate ou en protéines [13].

## I.8. Utilisations

### I.8.1. Lin (*Linum usitatissimum*)

✓ **Chimie du végétal** : l'huile de lin entre dans la composition des peintures, encres, linoleum, savons, produits de traitement du bois et carrelage, etc. Les pailles de lin peuvent entrer dans la fabrication de pâte à papier, de matériaux composites ou encore de litières pour animaux.

✓ **Alimentation animale** : les animaux d'élevage peuvent consommer soit les tourteaux, soit les graines de lin entières. Les oméga-3 du lin ont des effets bénéfiques sur la qualité de la viande, du lait ou des œufs [21].

### I.8.2. Soja (*Glycine max*)

Le soja est principalement cultivé pour ses graines. En Extrême-Orient, le soja est utilisé pour la fabrication d'aliments traditionnels à base de soja comme le tofu, le tempeh et le lait de soja, tandis qu'en Occident, le soja est broyé en huile et en farine dégraissée. Le tourteau est principalement utilisé pour l'alimentation animale. Une petite partie est ensuite transformée en ingrédients alimentaires, notamment en farine de soja, en concentrés, en

isolats et en protéines texturées. Ces ingrédients peuvent être utilisés comme émulsifiants, agents moussants et améliorateurs de texture dans les aliments ou avoir une valeur nutritionnelle dans les nouveaux aliments à base de soja comme les hamburgers de soja et le fromage de soja [8].

### I.9. Domaine médical

#### I.9.1. Lin (*Linum usitatissimum*)

L'utilisation du lin en médecine remonte à des temps antiques. Pline l'Ancien, dans sa volumineuse Histoire naturelle datée du 1<sup>er</sup> siècle de notre ère, répertorie une trentaine de médicaments à base de graines de lin. Ils font toujours partie des pharmacopées traditionnelles chinoises et ayurvédique. Les préconisations des auteurs antiques, puis des médecins jusqu'au XVIII<sup>e</sup> siècle, sont nombreuses et variées mais on peut noter que, dès l'Antiquité, « tout est dit ».

On sait que le lin vaut en médecine pour l'huile qu'on tire de l'amande de ses graines et pour le mucilage présent dans leur tégument. On a cerné ses deux principaux usages, encore d'actualité de nos jours : le lin est à la fois un puissant émollient, il calme les inflammations et il est employé autant en usage externe qu'interne. Dioscoride, au 1<sup>er</sup> siècle de notre ère, indique que les graines cuites dans du miel, de l'huile et de l'eau ramollissent « toutes les inflammations du dedans et du dehors ». La décoction de graines de lin « fait vider les excréments du ventre ».

Reprenant les propos de Pline, des auteurs comme Daléchamps apprennent que « la farine de ceste graine incorporée avec du nitre, ou sel, ou cendre sert grandement à mollifier les muscles, les nerfs, les jointures... Avec des figues, elle fait venir les apostumes [abcès] à maturité ». Elle traite les hémorroïdes « et tous les accidents du fondement, les crevasses... ». Mélangée à de l'eau de rose ou de nénuphar, l'huile guérit les brûlures.

Dans les pratiques traditionnelles des siècles derniers, les infusions de graines de lin, prises en gargarisme ou en collyre, étaient employées pour calmer les inflammations. Les sages-femmes s'en servaient pour lubrifier le passage lors de l'accouchement au moment de la présentation de la tête de l'enfant. En usage externe, les chirurgiens usaient de farine de lin en cataplasme pour calmer les inflammations et les brûlures de la peau.

Administrés par voie interne, l'huile de lin et son mucilage ont, de tout temps, traité la constipation, apaisé les inflammations des organes internes, digestifs et urinaires. De nos jours

encore, on utilise le lin pour soigner la constipation, les gastrites ainsi que le syndrome de l'intestin irritable, les cystites et les coliques néphrétiques [21].

### **I.9.2. Soja (Glycine max)**

Le soja fait partie intégrante de la culture asiatique, tant comme aliment que comme médicament, depuis de nombreux siècles. En Occident, le soja est surtout connu pour sa teneur en protéines, mais de plus en plus, les aliments à base de soja sont reconnus comme ayant un rôle potentiel dans la prévention et le traitement des maladies chroniques, notamment le cancer et les maladies cardiaques. Les aliments à base de soja peuvent également jouer un rôle dans la lutte contre l'ostéoporose et les maladies rénales. Bien que des recherches supplémentaires soient nécessaires, la base de données existante sur les effets de la consommation de soja sur la santé est assez vaste et mérite clairement une plus grande reconnaissance de la part des communautés de recherche et des milieux cliniques [22].

# Chapitre II

**Chapitre II. La valeur nutritionnelle**

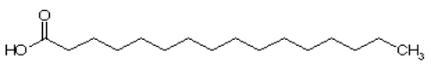
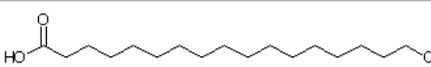
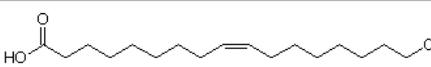
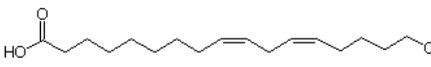
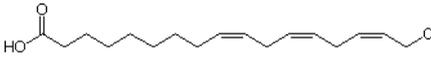
**II.1.Composition biochimique de lin**

La composition de la graine (pour un génotype donné) varie en fonction de son degré de maturité, ainsi que des conditions biotiques et abiotiques de culture [23].

**II.1.1. l'huile de lin**

Les graines de lin contiennent de 35 à 45% d'huile, ce qui permet de classer le lin dans la catégorie des oléagineux. Une partie de l'huile se trouve dans la cuticule (10%). Cependant la majorité de l'huile est localisée au niveau des cotylédons (78%) et de l'endosperme (12%) sous forme de globules lipidiques oléosomes (de diamètre moyen 1,3UM). Les oléosome contiennent des lipides neutres (triglycérides de 96 à 98 %), des lipides polaires (phospholipides et glycolipides de 1 à 6 %) et des oléosine (1,3%). La répartition des acides gras de l'huile de lin est précisée tableau [24].

**Tableau II.1.**Composition en acides gras de l'huile de lin [35].

Nom commun de l'acide gras	Nomenclature biochimique	Formule semi-développée	Répartition (%)
Acide palmitique	C16 :0		4 - 6
Acide stéarique	C18 :0		2 - 3
Acide oléique	C18 :1 ω9		10 - 22
Acide linoléique	C18 :2 ω6		12 - 18
Acide α-linolénique	C18 :3 ω3		50 - 62

Les variations de teneur en acide α-linolénique sont principalement dues au génotype du lin, ainsi qu'à ses conditions de culture. Certaines études ont montré que les lins cultivés à basse température contenaient une huile à plus haut degré d'insaturation. Ces observations ont également été confirmées en comparant les profils en acides gras des lins de printemps et

d'hiver. ; Un écart de 4% supérieur en acide  $\alpha$ -linoléique a été identifié pour les variétés d'hiver.

Les semenciers canadiens ont développé par mutations génétiques et croisements, des variétés de lin à faible taux d'acide  $\alpha$ -linoléique ; les variétés Solin. Depuis, d'autres sélections génétiques ont conduit au développement de variétés dont l'huile contient différentes proportions d'acide  $\alpha$ -linoléique (tableau II.2) [24].

**Tableau II.2.** Répartition en acides gras de différents types de lin [24].

Echantillon	C16 :0	C18 :0	C18 :1	C18 :2	C18 :3
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Lin	4,8	3,6	21,0	22,8	57,4
Lin hautement saturé	27,8	2,8	11,3	6,6	44,0
Solin	5,6	3,4	15,4	71,9	2,2
Lin à haute teneur acide oléique	15,3	4,0	49,3	21,6	9,3
Lin à haute teneur en acide $\alpha$ -linoléique	4,5	2,3	10,0	10,7	71,8

### II.1.2. Protéines

Le taux de protéines varie entre 10,5 et 31% dans les graines de lin. Ces variations sont tributaires du génotype, cependant les conditions pédoclimatiques ont également un impact sur l'accumulation des protéines. Ainsi, de 2000 à 2001, une variation de 2% de teneur en protéines a été relevée sur la variété n°1 Canadian Western.

Les protéines du lin se répartissent majoritairement dans les cotylédons (76%) et dans l'endosperme (16%). Les deux principales protéines identifiées sont des protéines de stockage : l'albumine et la globuline. La proportion d'albumine dans la graine varie entre 26 et 41% du total des protéines, cette proportion dépendant des variétés de lin [25].

### II.1.3. Composés glucidiques

Deux types de composés glucidiques sont identifiés dans la graine mature : l'amidon, présent en faible quantité (de 1 à 2%) et le mucilage (de 3,4 à 9,4%). Le mucilage est un polysaccharide hétérogène, composé d'oses neutres et acides. Les oses majoritaires identifiés dans le mucilage sont, le D-xylose (19-38%), l'acide Dglucuronique (21-36%), le L-galactose (12-16%) et le L-rhamnose (11-16%). Les oses minoritaires sont le L-arabinose (8-13%), le

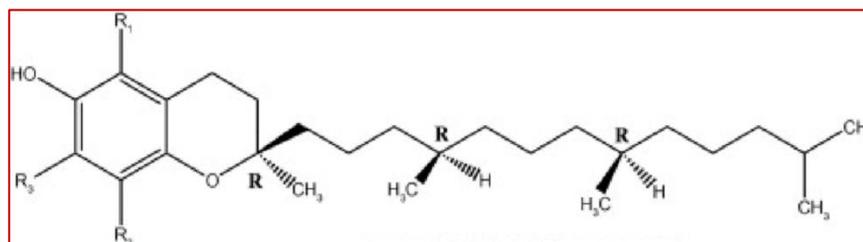
L-fructose (3,9%) et le D-glucose (4-6%). Cependant la composition du mucilage dépend des variétés de lin et des conditions de culture [26].

### II.1.4. Composés antioxydants du lin

Deux catégories de molécules possédant une activité antioxydante sont présentes dans la graine de lin : les tocophérols et les polyphénols.

#### ❖ Les tocophérols

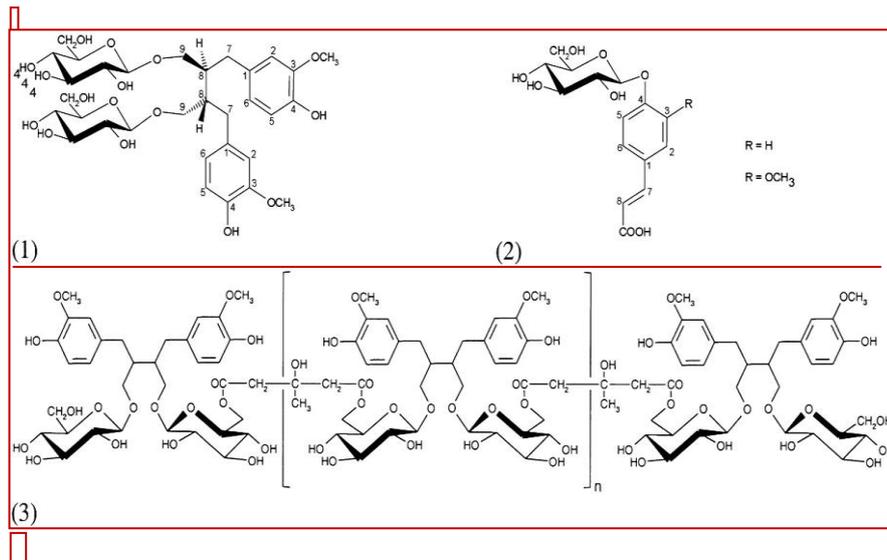
Les tocophérols appartiennent à la classe des vitamines liposolubles. La solubilité dans l'huile des tocophérols est due à la présence d'une chaîne aliphatique à 16 atomes de carbone (figure II.1). Celle-ci est greffée sur un noyau chromanol qui est à l'origine de l'activité antioxydante des tocophérols. Les formes isomériques des tocophérols sont différenciées par la position du groupement méthyle greffé sur le noyau aromatique (figure II.1). On distingue ainsi les isomères de position nommés alpha, beta, gamma et delta tocophérol [25].



**Figure II.1.** Formule chimique des tocophérols (structure R, R, R) [25].

#### ❖ Les polyphénols

Les polyphénols sont des métabolites secondaires spécifiques au règne végétal, et sont caractérisés par la présence d'un cycle benzénique avec un ou plusieurs groupements hydroxyles libres ou liés à un substituant (groupement alkyle, ester ou glucidique). Les lignanes et les acides phénoliques sont les deux catégories de polyphénols identifiés chez le lin [26].



**Figure II.2.** Structures chimiques du Sécoisolariciresinol Di Glucoside (SDG) (molécule 1), de l'acide glucopyranosyl-p-coumarique ; R=H et de l'acide glucopyranosylférulique ; R = OCH<sub>3</sub> (molécule 2), et de l'oligomère composé de SDG et d'acide 3-hydroxy-3-méthylglutarique (molécule 3) [27].

Le lignane caractéristique du lin est le Sécoisolariciresinol Di Glucoside (SDG). Il est présent à une concentration de 1 à 1,9 g/100g et est principalement localisé (à 66%) dans la pellicule de la graine. Ces molécules sont présentes sous forme glycosylée ou polymérisée (molécule 3, figure II.2). Leur quantification dépend donc essentiellement de la méthode d'extraction employée et de l'étape consécutive d'hydrolyse chimique effectuée, alcaline ou acide. Une quantité d'acides phénoliques de 790 à 1030 mg/100g de graines a été rapportée dans la littérature et 48 à 66% de ces acides phénoliques seraient estérifiés (molécules 1 et 2, figure II.2). Les principaux acides phénoliques identifiés dans les graines de lin sont l'acide para-hydroxybenzoïque, l'acide férulique, l'acide vanillique, l'acide p-coumarique, et l'acide sinapique [28].

## II.2. Composition biochimique du soja

Outre la présence intéressante de protéines, lipides et glucides, la graine de soja contient les vitamines liposolubles A,D,E,K et est particulièrement riche en vitamine B et en minéraux mais aussi en micronutriments tels que les isoflavones, les saponines, les stérols, les phytates et les inhibiteurs de protéases qui apportent au soja des propriétés préventives, prouvées ou à l'étude, à l'égard de certaines pathologies.

Il est à noter que le germe de soja contenu dans la graine (2-3 % de son poids) retient de plus en plus une attention particulière car il présente un profil nutritif unique par rapport à la composition de la graine entière, des isolats ou des concentrés [23].

### II.2.1. Facteurs antinutritionnels et effet de la cuisson

Les graines de soja contiennent des facteurs antinutritionnels (dont la plupart sont thermolabiles) qui réduisent la digestibilité, rendant les graines crues de soja impropres à la consommation et réduisent la qualité nutritionnelle de ces graines. On a : les inhibiteurs trypsiques, les  $\alpha$ -galactooligosaccharides, les phytates, les lipoxygénases, les lectines et l'uréase. Le type et l'intensité du chauffage des graines ont une influence sur la valeur nutritionnelle, c'est là toute la difficulté de trouver un compromis entre l'inactivation des facteurs antinutritionnels et la conservation de la qualité nutritionnelle en particulier des protéines. Le chauffage excessif provoque une perte plus ou moins importante des éléments nutritionnels c'est pourquoi l'inactivation totale des facteurs antinutritionnels par le chauffage n'est pas recherchée. L'inactivation thermique peut simplement se baser sur la destruction du facteur antinutritionnel le plus thermorésistant représenté par les inhibiteurs trypsiques. Ces facteurs antinutritionnels peuvent aussi être inactivés par les techniques de concentrations protéiques [29].

**Tableau II.3.** Composition nutritionnelle de la graine de soja (en pourcentage du poids total de la graine) [30].

	<b>Poids total (%)</b>	<b>Poids sec (%) : 91,4 %</b>
Eau	8	
Protéines	34,3	40 – 45
Lipides	18,7	17 – 22
Glucides totaux	31,6	38,4
Glucides digestibles	13,6	16,4
Amidon	0,7	0,8
Fibres alimentaires	18	22
Minéraux	4,5	5,1

### II.2.2. Protéines

Les protéines constituent la seule source d'azote assimilable par l'homme en apportant les acides aminés indispensables à la construction et au renouvellement des tissus de l'organisme, Les graines de soja sont une source importante de protéines ; elles représentent la plus grande part de la graine entière soit 40 % du poids sec ou 34% du poids total.

Les protéines de la graine de soja ont une valeur nutritionnelle proche de celle de la viande de par le profil protéique de la graine mais aussi la digestibilité de ses protéines, la composition protéique de ces graines couvre largement les besoins en acides aminés essentiels et semi-essentiels pour l'Homme (lysine, histidine, thréonine, tryptophane, tyrosine, leucine, isoleucine, phénylalanine, valine) excepté pour la méthionine et la cystéine, acides aminés soufrés qui, dans la gaine de soja (et dans d'autres légumes secs) sont considérés comme des acides aminés limitants et peuvent donc réduire la synthèse de nouvelles protéines corporelles sans apport d'une alimentation variée. Cependant, en complétant la nourriture à base de soja par des céréales (riz, blé, maïs, sorgho, millet...) qui sont riches en acides aminés soufrés, l'apport en protéines devient équilibré. C'est ce que font instinctivement depuis des millénaires les civilisations en associant légumineuses et céréales en l'absence de protéines animales. Par exemple le riz est associé aux lentilles en Inde, le maïs associé aux haricots rouges en Amérique latine et le riz associé au soja en Chine, De plus la teneur en lysine, acide aminé véritablement essentiel qui facilite la synthèse des protéines et l'assimilation des autres acides aminés, est limitée dans de nombreux aliments végétaux, contrairement au soja dont les concentrations en lysine sont largement suffisantes selon les recommandations de la FAO (Food and Agriculture Organization) et de l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé). Le soja et les céréales sont donc des aliments complémentaires au niveau protéique [32].

### II.2.3. Lipides

Les graines de soja contiennent entre 17 et 22 % de leur poids sec en lipides, Elles sont pauvres en acides gras mono-insaturés et saturés qui eux ont un fort pouvoir athérogène, et font partie des graines huileuses les plus riches en acides gras polyinsaturés totalisant 54 à 72 % des lipides totaux, Parmi eux, les acides linoléiques (oméga 6) et alpha-linoléniques (oméga 3), principaux acides gras essentiels à l'organisme car non synthétisables, sont les mieux représentés, Les acides gras polyinsaturés permettent la synthèse de dérivés supérieurs et de métabolites (prostaglandines, leucotriènes) sous l'action d'enzymes (désaturase, élongase) et interviennent dans la constitution des tissus et des membranes cellulaires de

l'organisme. Mais la teneur en lipide des graines est très variable en fonction de la variété de soja et des conditions de cultures [32].

**Tableau II.4.**Répartition en acides gras de différents types de lin [32].

Acides gras saturés	11 – 21
• Acide stéarique	3 – 6
• Acide palmitique	8 – 13
Acides gras mono-insaturés	17 – 27
• Acide oléique	17 – 26
Acides gras polyinsaturés	54 – 72
• Acide linoléique	50 – 62
• Acide alpha-linolénique	4 – 10

### II.2.4. Glucides

La graine de soja est un oléo-protéagineux du groupe des légumineuses qui contient 38 % de sucres classés en deux catégories : on retrouve en majorité, les polysaccharides insolubles principalement dans les fibres de la graine et en minorité les polysaccharides solubles. Ces glucides solubles pour la plupart de faible poids moléculaire (arabinose, fructose, raffinose, rhamnose, saccharose, stachyose, verbascose) constituent 16,4 % du poids sec.

Parmi les polysaccharides digestibles, on retrouve l'amidon qui est un glucide insoluble faiblement représenté dans les graines de soja (moins d'1 % du poids sec de la graine de soja), contrairement aux tubercules, aux graines de céréales et aux autres graines de légumineuses, Les autres polysaccharides digestibles des graines de soja sont représentés par l'arabinose, le fructose, le rhamnose et le saccharose qui sont solubles [32].

### II.2.5. Vitamines et minéraux

La graine de soja riche en vitamines, contient toutes les vitamines liposolubles A, D, E, K [34] mais aussi des quantités significatives de vitamines hydrosolubles du groupe B (B1 ou thiamine, B2 ou riboflavine, B3 ou PP ou niacine, B5 ou acide pantothénique), Elle

possède également 4 à 5 % de minéraux dont le potassium, le phosphore, le magnésium et le calcium sont les principaux[27].

### II.2.5.1. Les vitamines du soja

Les vitamines sont indispensables au fonctionnement des mécanismes enzymatiques membranaires et sont apportées par l'alimentation, par conséquent l'absence de l'une d'entre elles peut perturber la croissance ou entraîner une carence spécifique.

Concernant les vitamines liposolubles, présentes essentiellement au niveau des membranes cellulaires, les vitamines A et D sont impliquées dans la modification de transcription d'ADN en ARN messager et agissent donc sur la synthèse des protéines, De plus la vitamine D sous forme de calcitriol participe au métabolisme phospho-calcique en augmentant l'absorption digestive de calcium et de phosphate et assure une minéralisation optimale des os. La vitamine A joue également un rôle important dans la vision et possède des propriétés antioxydantes sous forme de  $\beta$ -carotène en limitant le stress oxydatif tout comme la vitamine E. Cette vitamine E, 10 à 20 fois plus concentrée dans le germe de soja que dans la graine entière, est principalement représentée par sa forme active alpha-tocophérol, dont la fonction première est de protéger les membranes cellulaires de la peroxydation. Quant à la vitamine K stockée dans le foie, elle exerce une action sur la synthèse hépatique des protéines de la coagulation en tant que cofacteur et participe aussi à la formation d'ostéocalcine qui favorise la fixation osseuse du calcium (mais joue également un rôle au niveau vasculaire dans la prévention de la calcification athérosclérotique. On peut trouver la vitamine K dans les produits traditionnels dérivés du soja sous la forme de vitamine K2, principalement dans le natto, élaboré lors du procédé de fermentation des graines de soja et dans d'autres aliments fermentés comme les fromages, mais aussi dans l'huile de soja. A ce jour, le natto serait l'aliment contenant la plus haute teneur en vitamine K [23].

### II.2.5.2. Les minéraux du soja

La graine de soja qui possède 4 à 5 % de minéraux avec principalement le potassium, le phosphore et le magnésium renferme aussi du calcium, du cuivre, du zinc, du fer, du manganèse et du sodium en quantités moindres. Le potassium joue un rôle dans l'excitabilité musculaire et dans le métabolisme des protéines et du glycogène. Son apport doit être limité à 1,5 g /jour. Le phosphore, lui est un élément majeur du système osseux et participe aux réactions de phosphorylation impliquées dans la production d'énergie. Quant au magnésium, il est impliqué dans l'adaptation au stress, dans l'excitabilité neuromusculaire et participe aux

réactions métaboliques et énergétiques. Le calcium, pratiquement absent des graines de soja est le principal constituant du squelette et intervient dans le métabolisme osseux, la conduction nerveuse, l'excitabilité neuromusculaire et la coagulation sanguine. C'est pour cela que certains produits dérivés du soja comme le tonyu ou les yaourts au soja en sont enrichis. Quant au fer contenu dans le soja, qui est donc d'origine végétale, il reste cependant difficilement absorbable par l'organisme[30].

### II.2.6. Tocophérols

Parmi les vitamines liposolubles retrouvées dans l'huile de soja, les tocophérols sont des composants phénoliques appartenant à la famille des vitamines E et sont considérés comme de puissants antioxydants dont la fonction première est de protéger les membranes cellulaires de la peroxydation, Ils font partie de la fraction lipidique de la graine de soja et sont 10 à 20 fois plus concentrés dans le germe que dans la graine entière [23].

Il existe plusieurs isomères : bêta-, gamma-, delta- et notamment l'alphatocophérol qui est le plus actif biologiquement. Les tocophérols ont la capacité d'absorber les radicaux libres, ce qui protège l'organisme du stress oxydatif. Ils s'opposent pareillement à l'oxydation des acides gras et pourraient aussi diminuer l'agrégation plaquettaire excessive, mécanismes physiologiques pouvant réduire le risque athérosclérotique. La vitamine E aurait également une action protectrice sur les érythrocytes. Toutefois les propriétés biologiques des tocophérols de l'huile de soja peuvent se voir diminuées par l'opération de raffinage qui réduit de 15 à 20 % la teneur en vitamine E [32].

### II.2.7. Saponines

Les graines de soja contiennent également en concentration non négligeable des saponines, groupe varié de molécules amphiphiles de grande taille aux propriétés émulsifiantes. On retrouve les groupes A et B dans les graines de soja, particulièrement dans le germe ; les saponines B sont retrouvées à la fois dans le cotylédon et dans le germe tandis que les saponines A sont exclusivement retrouvées dans le germe de soja et lui confèrent une saveur amère et astringente Ces composés apporteraient des propriétés bénéfiques pour la santé et contribueraient fortement aux vertus des produits dérivés du soja particulièrement s'ils sont fermentés. Notamment les activités antioxydantes et hypocholestérolémiantes des saponines seraient efficaces pour diminuer le risque athérosclérotique. Les saponines auraient aussi des propriétés hépatoprotectrices et antitumorales particulièrement vis-à-vis du cancer

du côlon et du cancer du poumon. Cependant à des doses importantes, ils peuvent être responsables de certains effets indésirables. Les saponines qui traversent la barrière intestinale pour atteindre la circulation sanguine peuvent provoquer une hémolyse par une action sur le cholestérol des membranes cytoplasmiques des hématies. L'interaction entre les saponines et les cellules pariétales de l'estomac peut aussi induire des nausées, des vomissements et une perte d'appétit [33].

### II.2.8. Phytostérols

Les phytostérols ou stérols végétaux sont des phytonutriments présents dans les membranes cellulaires de la graine de soja. Ils sont significativement plus concentrés dans le germe de soja notamment en bêta-sitostérol, mais leur concentration varie largement en fonction des conditions de culture. Ces composants intègrent l'huile de soja à une concentration qui varie de 250 à 400 mg/100 g et seraient bénéfiques pour diminuer le risque cardiovasculaire par un effet hypocholestérolémiant. Ils ont la caractéristique d'avoir une structure proche de celle du cholestérol ce qui leur permet d'entrer en compétition avec le cholestérol alimentaire au moment de l'absorption intestinale. Dans l'intestin grêle les micelles qui transportent les lipides alimentaires pour être absorbés par les entérocytes, ont une meilleure affinité avec les phytostérols sous forme libre (particulièrement avec le bêtasitostérol) qu'avec le cholestérol libre. Ce phénomène induit une diminution du cholestérol libre au sein des micelles et donc induit une diminution de l'absorption du cholestérol au niveau des entérocytes. Ceci a pour conséquence une levée de l'inhibition par le cholestérol libre de la synthèse de récepteur LDL hépatique et donc une augmentation de la synthèse de ces récepteurs. Ainsi on peut observer un surcroît de la captation de LDL-cholestérol par les hépatocytes ce qui permet de faire diminuer la concentration sérique de LDL-cholestérol qui constitue un facteur de risque cardiovasculaire. En conséquence l'huile de soja pourrait avoir un effet hypocholestérolémiant entre autres grâce aux phytostérols, toutefois seulement si l'huile n'a pas été raffinée [32].

### II.2.9. Phytates

Les phytates majoritairement retrouvés parmi les protéines dans les cotylédons de la graine de soja, sont des composés qui constituent la réserve principale de phosphore du grain. Au moment de la digestion il a la particularité de jouer un rôle de chélateur sur certains minéraux en générant des complexes moléculaires insolubles avec les cations divalents tels

que  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  ou  $\text{Mg}^{2+}$  ce qui peut modifier leur biodisponibilité et diminuer leur absorption et donc leur fonction. C'est pour cela que l'acide phytique est considéré comme un facteur antinutritionnel. Il a d'ailleurs conduit à la supplémentation en zinc et en fer dans les préparations à base de protéines de soja pour les nourrissons [33].

### II.2.10. Inhibiteurs de protéases

Les inhibiteurs de protéases sont des protéines qui ralentissent l'hydrolyse des protéines alimentaires par les enzymes pancréatiques (trypsine et chymotrypsine). Aussi appelés inhibiteurs tryptiques, on les retrouve dans la fraction protéique des graines de soja majoritairement sous deux formes: inhibiteur de Bowman-Birk (BBI) et inhibiteur de Kunitz (KI). Ces inhibiteurs de protéases font partie des facteurs antinutritionnels contenus dans les graines de soja car ils contribuent avec les autres facteurs antinutritionnels à réduire la digestibilité rendant les graines crues de soja impropres à la consommation. De plus l'inhibiteur de Kunitz a été identifié comme allergisant. L'élimination de ces inhibiteurs de protéases dans les graines de soja est donc nécessaire et peut s'effectuer par une inactivation thermique ou par un processus de fermentation [32].

### II.2.11. Lunasine

La lunasine est un peptide du soja qui a récemment été identifié comme ayant une activité anticancéreuse au niveau des cellules mammaires en empêchant leur transformation causée par des composés chimiques carcinogènes ou des oncogènes viraux. Elle ralentirait également l'apparition du cancer de la peau par diminution de la prolifération cellulaire au niveau de l'épiderme. De plus une récente étude montre que la lunasine en prise orale donnée à des souris réduirait de 94 % le nombre de tumeurs métastatiques du côlon ce qui fait de la lunasine une protéine à fort potentiel anticancéreux. Cependant il demeure pratiquement absent des produits fermentés [31].

### II.2.12. Phytoestrogènes, les isoflavones de soja

Les isoflavones de soja, polyphénols végétaux antioxydants font partie des composés les plus importants de cette graine car ils constituent la quasi-totalité de l'apport en phytoestrogène des femmes asiatiques et sont à l'origine d'espairs thérapeutiques mais aussi d'inquiétudes vis-à-vis par exemple des cancers. En premier lieu, les isoflavones de soja sont à définir pour mieux comprendre son mécanisme d'action dans l'organisme, grâce à l'étude

de sa structure, de ses cibles thérapeutiques, de sa métabolisation, en fonction des quantités absorbées [23].

# Chapitre III

### Chapitre III. Séchage.

#### III.1. Introduction

Le séchage est l'une des principales techniques de préservation des produits agricoles et alimentaires. C'est par ailleurs un procédé qui intervient dans la fabrication de nombreux produits alimentaires, comme étape à part entière de la transformation ou à titre accessoire (congélation, cuisson,...).

Le mode de séchage le plus utilisé dans l'industrie alimentaire est le séchage par entraînement : la température reste inférieure à celle d'ébullition de l'eau et le gaz reçoit l'humidité extraite de celui-ci. Le séchage est alors défini comme étant un double transfert de chaleur et de masse.

La compréhension des phénomènes mis en jeu repose sur une bonne connaissance des équilibres entre l'air et le produit et sur la maîtrise des cinétiques de séchage et de transformation du produit [34].

#### III.2. Définition

Le séchage est défini comme une réduction de l'humidité de la matière alimentaire pour augmenter la concentration solide réduisant ainsi les possibilités de dégradation de diverses origines.

Cette opération fait intervenir deux phénomènes: un transfert de chaleur vers la matrice pour faciliter la vaporisation de l'eau, et un transfert de matière (fréquemment de l'eau liquide pour le transfert interne et de la vapeur d'eau pour le transfert externe) de la matière vers l'atmosphère environnante [35].

#### III.3. Principe du séchage

Le séchage est une opération consistante à retirer une partie du solvant (le plus souvent l'eau) d'un corps, par vaporisation, le produit final dit « sec » est obtenu sous une forme solide de taille variable, une opération de séparation thermique, dans le sens qu'il faut fournir l'énergie de vaporisation du solvant, pour qu'il quitte le produit sous forme de vapeur [36].

#### III.4. Objectifs du séchage

Le séchage est un procédé de conservation extrêmement ancien dont l'objectif principal est de convertir des denrées périssables en produits stabilisés par abaissement de

l'activité de l'eau. I.e., diminuer la disponibilité d'eau libre, interdire ou minimiser toute activité de dégradation (microbienne, enzymatique, oxydation de lipides, réactions chimiques...) [37]. Outre, il permet la réduction de poids (et souvent de volume) des produits secs et facilite leur conditionnement, leur transport et leur stockage [35].

### III.5. Caractéristiques de l'air humide

L'emploi d'air pour le séchage nécessite l'introduction de certaines notions relatives à l'air humide. Comme son nom l'indique, l'air humide est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau. La teneur en humidité peut être caractérisée par différentes variables : la pression partielle en vapeur d'eau  $P_e$  en  $P_a$ , la teneur massique rapportée à l'air sec ou humidité absolue  $Y$  en kg/kg d'air sec, ou l'humidité relative HR.

L'humidité absolue  $Y$  est définie par l'éq. III.1. L'humidité relative, généralement exprimée en %, est le rapport entre la pression partielle en vapeur d'eau et la pression de vapeur saturante à la température considérée (éq. III.2).

$$Y = 0.622 \frac{P_e}{P_{atm} - P_e} \quad (\text{III.1}).$$

$$\text{HR} = 100 \frac{P_e}{p_e^{sat}} \quad (\text{III.2}).$$

Le volume humide  $V_{hum}$  est défini comme le volume occupé par l'air et la vapeur d'eau rapporté à 1 kg d'air sec. La masse volumique  $\rho_a$  est définie comme la masse totale 'air + vapeur d'eau' rapportée au volume occupé. Ces deux grandeurs seront utilisées pour le calcul de la vitesse de l'air de séchage. Une autre caractéristique importante est la température de bulbe humide  $T_h$ . Il s'agit de la température d'équilibre évaporatoire dynamique indiquée par un thermomètre dont le bulbe est entouré d'une mèche de coton humidifiée [38].

### III.6. Principes physiques du séchage

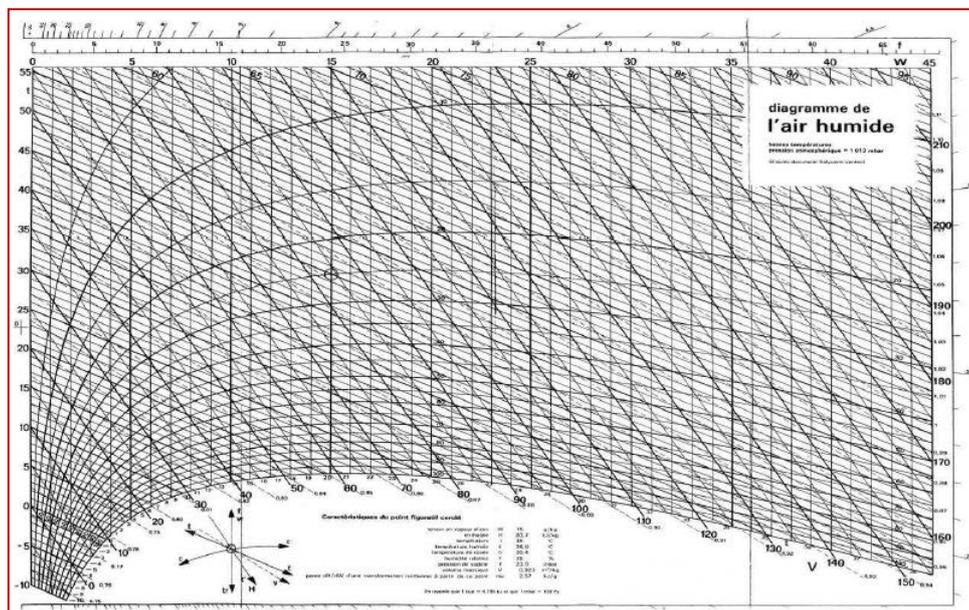
Deux mécanismes peuvent être mis en œuvre pour extraire par évaporation l'eau d'un produit, l'entraînement et l'ébullition.

#### III.6.1 Séchage par entraînement

Dans les séchoirs par entraînement, les produits sont placés dans un courant d'air chaud et sec dont la pression de vapeur est inférieure à celle du produit. L'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau est apportée par l'air chaud qui par la même occasion sert de vecteur

pour évacuer l'eau évaporée. L'eau est évaporée sous l'effet du gradient de pression partielle en eau, sans atteindre sa température d'ébullition.

Dans le cas idéal où toute l'énergie nécessaire à la vaporisation est apportée par convection à partir de l'air chaud, et s'il n'y a pas de perte de chaleur, le séchage est dit isenthalpique. La température du produit ne dépend alors que des caractéristiques de l'air et de l'activité de l'eau ( $A_w$ ) à la surface du produit. Dans ce cas, le diagramme de l'air humide présenté sur la figure (III.1), utilisé pour le dimensionnement d'un tel séchoir, permet de suivre les variations des caractéristiques de l'air humide au cours du séchage. Dans le cas où d'autres modes d'apport de chaleur se combinent à la convection dans le cas du séchage par entraînement, le séchage est alors non isenthalpique[39].



**Figure III.1.** Diagramme de l'air humide [39]

### III.6.2. Séchage par ébullition

Dans ce cas, le mécanisme mis en œuvre pour vaporiser l'eau d'un produit est l'ébullition. Cette dernière a lieu lorsque le flux thermique, transféré au produit est très intense (il y a un grand écart de température entre la source et le produit). Dans ce cas, la température du produit atteint une valeur telle que la pression de vapeur d'eau en équilibre avec ce matériau ( $P_v$ ), est égale ou dépasse à la pression totale ambiante ( $P_t$ ). A titre d'exemple, on peut citer l'immersion d'un produit dans l'huile chaude [40].

### III.7. Modes de séchage

#### 1. Séchage direct (par convection)

Le séchage par convection, c'est un mode de transfert d'énergie le plus courant. Il consiste à mettre en contact un gaz (air) s'écoulant en régime généralement turbulent autour du corps à sécher qui peut se présenter sous forme de particules, de gouttelettes, de films ou de plaques [41].

#### 2. Séchage indirect (par conduction)

Le produit se trouve en contact avec une paroi conductrice de chaleur qui est chauffée par un fluide caloporteur (air, eau, gaz, vapeur d'eau). Sous l'action de la chaleur ainsi transmise par conduction, le liquide s'évapore ou se vaporise. La vapeur formée étant entraînée par action d'un léger courant de gaz auxiliaire ou par dépression [34].

#### 3. Séchage par rayonnement

On sait que toute surface dont la température est supérieure au zéro absolue émet un rayonnement capable de se transformer en chaleur, et que l'émittance énergétique totale d'une surface ou flux de chaleur émis par l'unité d'aire de cette surface, est proportionnelle à la quatrième puissance de la température absolue de la surface.

#### 4. Séchage sous vide

Le point d'ébullition d'un liquide s'abaissant lorsqu'on diminue la pression, le séchage réalisé sous vide provoque l'ébullition rapide du liquide à éliminer. L'opération qui s'effectue alors par vaporisation s'en trouve accélérée et la durée du séjour de la matière dans le séchoir écourtée. Ce mode opératoire rend ainsi possible le séchage de substances thermosensibles, difficile à traiter sous pression normale, en raison du séjour plus ou moins long qu'elles devraient subir à température élevée.

#### 5. par perte diélectrique

Le séchage par pertes diélectriques est basé sur le chauffage par l'électricité des substances non conductrices (diélectrique). On l'obtient en plaçant la matière à sécher dans un champ électrique alternatif à très haute fréquence (1 à 30Mhz). Un tel champ existe entre les armatures d'un condensateur plan relié à un générateur. Sous l'action de ce champ, les

molécules du diélectrique se polarisent et sont contraintes de changer de polarité à chaque alternance.

### 6. Séchage par lyophilisation

Il s'applique essentiellement à des produits biologiquement instables ou altérables à l'état frais. Le produit est rapidement congelé et placé dans une enceinte à basse pression pour éviter sa liquéfaction. Le vide créé déplace les équilibres thermodynamiques et permet à la glace de se sublimer sous l'effet d'un apport de chaleur (plateaux chauffants, micro-ondes, ...).

La lyophilisation est un procédé qui présente l'avantage d'obtenir des produits secs peu déformés et facilement réhydratables. En revanche, ce procédé est très coûteux [42].

### 7. Séchage à l'aire libre

Méthode ancestrale utilisée jusqu'au jour d'aujourd'hui, consistant à étaler en plein air les Produits à sécher. C'est une technique facile et pas coûteuse, néanmoins elle peut causer des Pertes importantes [34].

## III.8. Description du produit humide

### III.8.1. Teneur en eau du produit

L'état d'hydratation d'un produit est caractérisé par sa teneur en eau définie par les relations (III.3) et (III.4). Soit  $m$  la masse d'un corps humide contenant une masse  $m_e$  d'eau et  $m_s$  de matière sèche.

L'humidité absolue du produit encore appelée taux d'humidité ou teneur en eau base sèche, est définie par la relation (III.3).

$$X = \frac{m_e}{m_s} = \frac{m - m_s}{m_s} \quad (\text{III.3}).$$

On définit l'humidité relative du produit ou titre en eau (exprimé en pourcentage) ou teneur en eau base humide par le rapport exprimé par (III.4).

$$X_{bh} = \frac{m_e}{m_e - m_s} = \frac{m - m_s}{m} \quad (\text{III.4}).$$

### III.8.2. Etat de l'eau dans un produit

La nature des liaisons entre l'eau et la matière organique dans le produit, permet de distinguer trois types de liaison.

- Lorsque l'eau est liée chimiquement au produit par association moléculaire, ou s'insère dans un réseau cristallin, on dit qu'elle est fortement liée. Le produit est dit hydraté. Cette eau d'hydratation (ou eau de constitution) ne peut être extraite du produit qu'en le détruisant.

- L'eau peut être liée au produit par des forces d'attraction de surface, d'origine moléculaire de type Van der Waals. La force de rétention diminue vers l'extérieur du produit. On dit alors que l'eau est retenue par osmose et peut jouer le rôle de solvant. On parle d'eau liée et son activité ( $A_w$ ) est inférieure à 1. Le corps est dit hygroscopique.

- Lorsque la tension de vapeur est égale à la tension de saturation, l'eau dans le produit est qualifiée d'eau libre. Cette eau se comporte comme l'eau pure à l'air libre ; son activité est égale à 1. Le corps est dit non hygroscopique.

Le séchage consiste à éliminer du produit la totalité de l'eau libre et une grande partie de l'eau liée. La nature des liaisons entre l'eau et le matériau influence le procédé de séchage et la qualité du produit sec [39].

### III.8.3. Activité de l'eau d'un produit

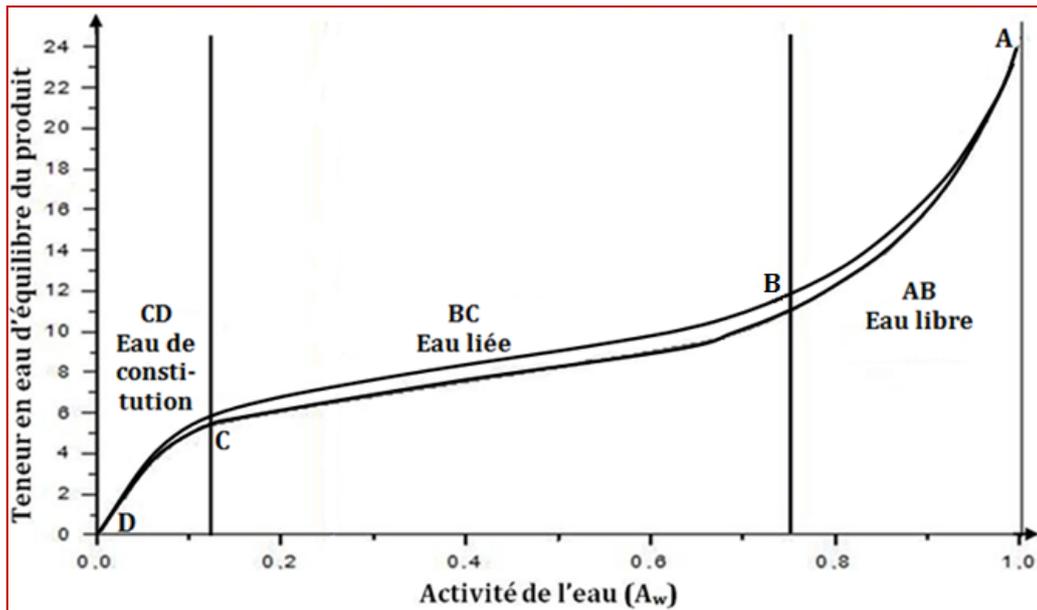
L'activité de l'eau ( $A_w$ ) d'un produit est le rapport entre la pression de vapeur d'eau du produit et la pression de vapeur de l'eau pure à la même température (III.5).

$$A_w = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (\text{III.5})$$

Elle représente l'humidité relative de l'air en équilibre avec le produit et indique la capacité du produit à retenir l'eau dans sa structure et à la maintenir pendant l'application des forces extérieures. La présence et l'état de l'eau dans un produit sont illustrés graphiquement par la représentation de la teneur en eau d'équilibre du produit en fonction de son activité de l'eau à une température donnée (III.6).

Cette courbe est appelée isotherme de sorption ou de désorption et est présentée sur la figure (III.2).

$$X_{eq} = f(A_w) \quad (\text{III.6})$$



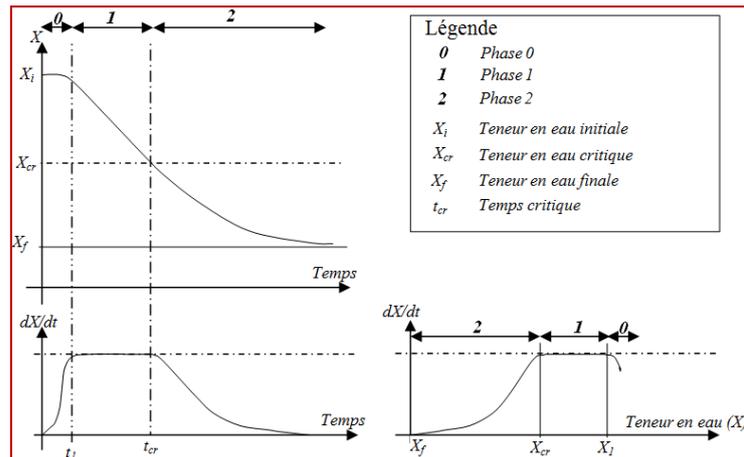
**Figure III.2.**Forme type d'isotherme de sorption-désorption d'un produit [39].

### III.9. Cinétique et phases de séchage

La cinétique de séchage permet de caractériser le comportement d'un produit au séchage. Elle est déterminée expérimentalement en plaçant dans un air dont les caractéristiques sont bien maîtrisées, un produit et mesurer l'évolution de sa masse à intervalle de temps régulier. L'allure de la perte en eau du produit au cours du séchage est décrite à partir de trois types de courbes :

- la courbe donnant la teneur en eau en base sèche ( $X$ ) (ou en base humide) en fonction du temps ( $t$ ),
- la courbe de la vitesse de séchage ( $\frac{dX}{dt}$ ) en fonction du temps ( $t$ ) obtenue en dérivant la fonction de la teneur en eau par rapport au temps,
- la courbe donnant la vitesse de séchage ( $\frac{dX}{dt}$ ) en fonction de la teneur en eau ( $X$ ).

L'analyse des cinétiques de séchage de la plupart des produits biologiques permet de distinguer trois phases ou périodes de séchage (figure III.3) :



**Figure III.3.** Courbes de cinétique de séchage présentant les 3 phases de séchage [39].

- la phase 0 ou période de mise en température,
- la phase 1 de séchage à vitesse constante qui correspond à l'évaporation superficielle de l'eau libre. Le produit reste en dehors du domaine hygroscopique, son activité ( $A_w$ ) reste proche de 1 et le séchage est contrôlé par les transferts externes. Pendant toute cette période, la température du produit est sensiblement égale à la température humide de l'air. La fin de cette phase permet de définir la teneur en eau critique du produit,
- la phase 2 de séchage à vitesse décroissante où l'activité de l'eau baisse et les transferts internes deviennent limitant. La température du produit croît à partir de la surface. La teneur en eau diminue jusqu'à atteindre la teneur en eau limite ( $X_{lim}$ ) qui dépend des caractéristiques de l'air de séchage (Température et humidité relative).  $X_{lim}$  se déduit de l'isotherme de désorption à la température ( $T$ ).

Une représentation fiable de l'équilibre et aussi de l'allure de la perte en eau du produit est nécessaire pour contrôler le procédé quelque soit le principe physique du séchage. Le contrôle ou la bonne conduite du séchage permet d'éviter l'altération du produit au cours du séchage [39].

### III.10. Séchage par micro-ondes

#### 1) Définition des micro-ondes

Les micro-ondes ou hyperfréquences sont des ondes électromagnétiques non ionisantes, composées d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Les fréquences des micro-ondes se situent dans le domaine des fréquences allant de 300 MHz à 300 GHz ce qui correspond à une longueur d'onde de 1 millimètre à 1 mètre. La fréquence la plus utilisée est

2450 MHz correspondant à la fréquence de la majorité des magnétrons des fours micro-ondes de cuisine ayant une puissance de 600 à 1000 Watts et une longueur d'onde dans l'air de 12,2 cm [43].

### 2) Mécanisme de chauffage par micro-ondes

Le transfert de chaleur sous chauffage micro-ondes est complètement inversé par rapport au chauffage conventionnel. La chaleur du chauffage conventionnel se transmet de l'extérieur vers l'intérieur. Sous chauffage micro-ondes, le volume traité devient lui même source de chaleur. On parle de dégagement de la chaleur de l'intérieur vers l'extérieur.

Deux types de mécanismes sont à l'origine de l'échauffement, le premier est relatif à la présence de charges libres, le deuxième est lié à la nature polaire des molécules.

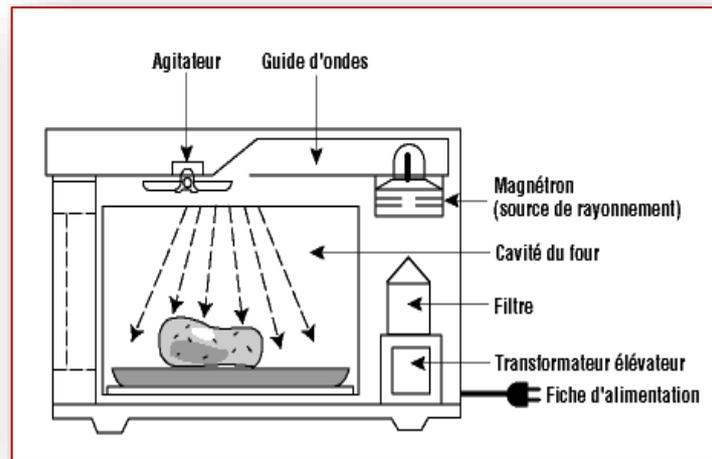
**Dans le premier cas**, les charges électriques libres (ions) soumises à un champ électrique E, vont migrer dans le sens du champ et sont à l'origine d'un courant de conduction. Il s'agit du mécanisme de conduction ionique. Les oscillations de ces charges, gênées par la présence de molécules fixes, produisent un échauffement par chocs.

**Dans le deuxième cas**, les matériaux composés de molécules formant des dipôles électriques, de répartition généralement aléatoire, s'orientent dans le sens du champ électrique extérieur imposé. Dans le cas d'un champ électrique alternatif, les dipôles changent «rapidement» de sens et la haute fréquence génère un mouvement aléatoire traduisant ainsi une haute température du système [43].

### 3) Four à micro-ondes

Un four à micro-ondes est constitué de trois éléments principaux (**figure III.4**).

- La génératrice micro-onde ;
- Le guide d'onde ;
- La cavité micro-onde.



**Figure III.4.** Schématisation des différents composants du four à micro-ondes [44].

#### 4) Séchage par micro-ondes

Le séchage par micro-ondes est très efficace pour les produits ayant une teneur en eau inférieure à 20%. Il représente une alternative pour améliorer la qualité des produits déshydratés [44]. Les micro-ondes peuvent être appliquées seules ou alors combinées avec d'autres procédés de séchage qui peuvent améliorer l'efficacité de séchage ainsi que la qualité organoleptique des produits alimentaires, qui est généralement meilleure que celle obtenue par séchage par micro-ondes seulement ou par d'autres techniques conventionnelles [43].

#### 5) Avantage des micro-ondes

Du point de vue chimique, les micro-ondes ne permettent pas d'affecter le matériel biologique, elles n'ont pas d'effet ionisant. Les micro-ondes ont une grande profondeur de pénétration ce qui entraîne une distribution de chaleur rapide et uniforme, principalement dans la partie humide du produit exposé, ce qui accélère le processus de séchage et limite la dégradation thermique. De plus, le séchage avec cette technologie présente un grand avantage en termes de coût et d'impact environnemental [45].

#### 6) Inconvénient des micro-ondes

L'inconvénient majeur de ce type de séchage est le séchage inégal (non uniforme), par ailleurs il peut aussi y avoir une :

- Production des mauvais goûts, particulièrement pendant les étapes finales du séchage ;
- Etouffement des produits alimentaires ;

- Changement de la texture qui pourrait être indésirable selon le produit final [45].

### III.11. Phénomènes se produisant au cours du séchage

Les interactions entre l'eau et les autres constituants dépendent de la mobilité de l'eau et des solutés, entraînant des réactions, des transformations physiques, des phénomènes mécaniques lors du séchage, du stockage et de la consommation [46].

- **Réactions biochimiques**

Il s'agit des réactions de Maillard, de l'oxydation de vitamines et de matières grasses, de la dénaturation de protéines, des réactions enzymatiques, etc. Certains prétraitements permettent de réduire la vitesse de ces réactions [47].

- **Phénomènes mécaniques**

Nous citons le croûtage, les déformations, les fissures.... Ces changements ne sont que partiellement réversibles lors de la réhydratation [48].

- **Transferts physiques**

Il y en a divers types : diminution de l'activité de l'eau, transition vitreuse, fusion de matières grasses, évaporation de constituants volatils, migration ou rétention de constituants volatils ou non [49].

# Chapitre IV

### Chapitre IV. Résultats et discussion.

#### IV.1. Introduction

Le séchage est l'une des plus anciennes méthodes de conservation des aliments. Durant le séchage l'eau est enlevée de l'aliment, réduisant le potentiel de croissance de micro-organismes et des réactions chimiques indésirables [45].

Notre travail, est basé sur l'étude comparative des travaux antérieurs, relatifs aux séchages des grains oléagineuses, en l'occurrence celle de Benrabah et Said (2019) [4], pour les grains de Lin (*Linum usitatissimum*) et celle de Mellouk et Adelahine (2014) [50] pour les grains de soja (*Glycine max*).

Les paramètres relatifs à la valeur nutritionnelles des grains oléagineuses, et qui sont influés par le séchage sont présentés ci-après.

#### IV.2. Taux d'humidité

Les résultats des travaux antérieurs relatifs aux taux d'humidité les résultats sont résumés dans les tableaux (IV.1) et (IV.2).

**Tableau IV.1.** Taux d'humidité de graines de lin (*Linum usitatissimum*) séchées par micro-onde [4].

	Séchage à 100w	Séchage à 180w	Séchage à 300w	Référence
Taux d'humidité (graine de lin)	3.66%	8%	9%	Benrabah et Said, (2019)

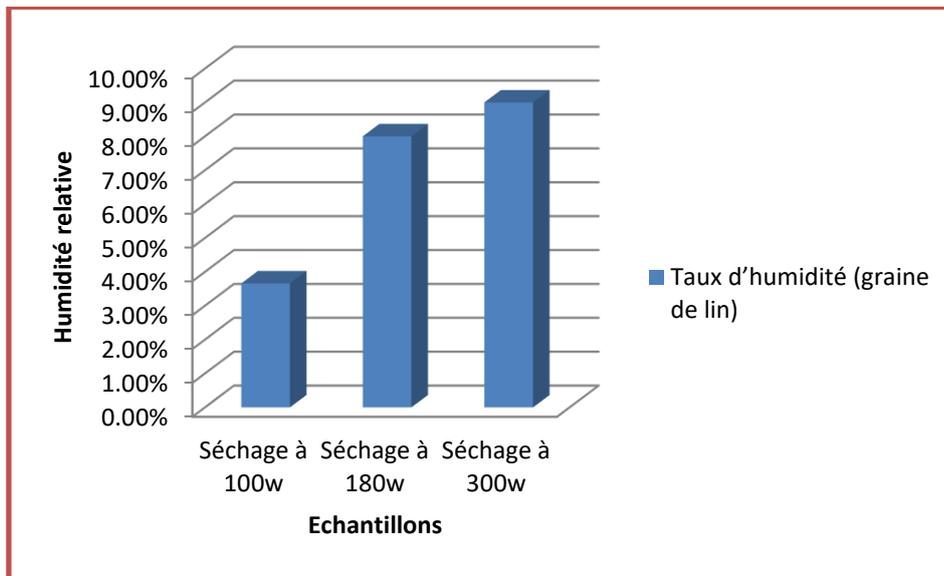
**Tableau IV.2.** Humidité des graines de soja (*Glycine max*) à 105 °C [50].

	Humidité à base sèche	Humidité à base humide	Référence
Taux d'humidité (graine de soja)	10 %	11.11%	Mellouk et Adelahine, (2014)

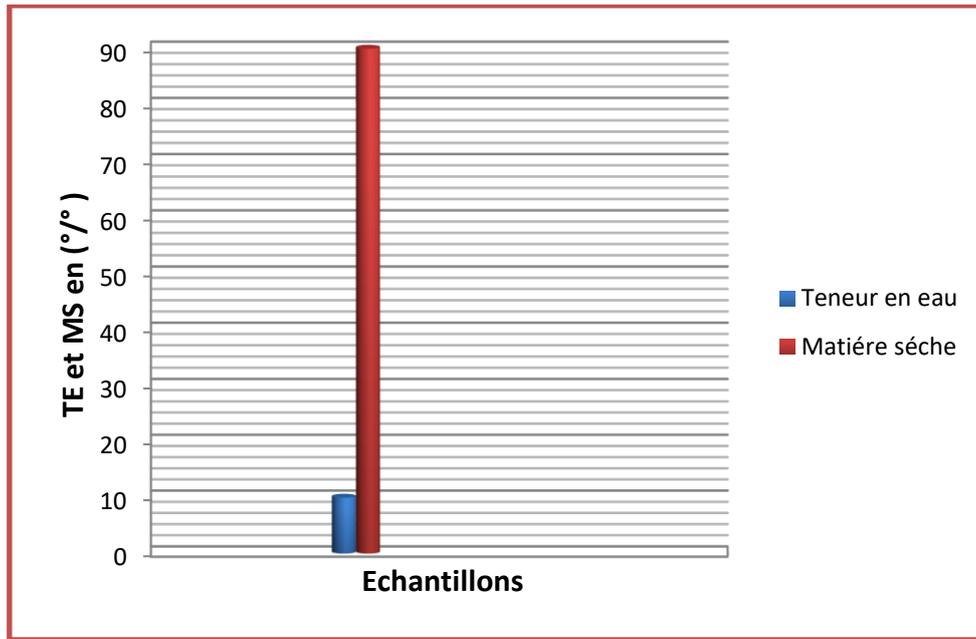
D'après les résultats obtenus par Benrabah et Said (2019) [4], les taux d'humidité déterminés aux puissances 100w, 180w et 300w sont respectivement équivalents à 3.66%, 8%, 9%.

Et selon Mellouk et Adelahine (2014) [50], la graine de soja est pauvre en eau ce qui constitue une bonne valeur de conservation qui est de 10 à 11.11 pour cent de son volume global ; ces valeurs sont conformes aux normes décrites par la littérature, qui prouve une réduction des facteurs antinutritionnels et même sur sa bonne conservation.

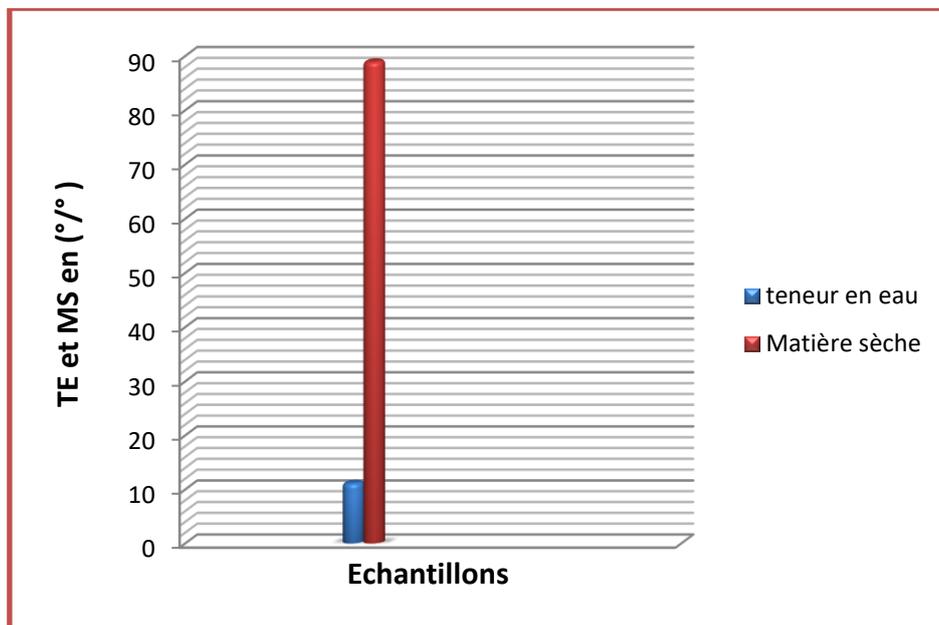
Les taux d'humidité des graines de lin et de soja représentés par les diagrammes (IV.1), (IV.2) et (IV.3).



**Figure IV.1.** Diagramme représente la teneur en eau des graines de lin (*Linum usitatissimum*) après le séchage [4].



**Figure IV.2.** Diagramme représente la teneur en eau des graines de soja (Glycine max) à base sèche [50].

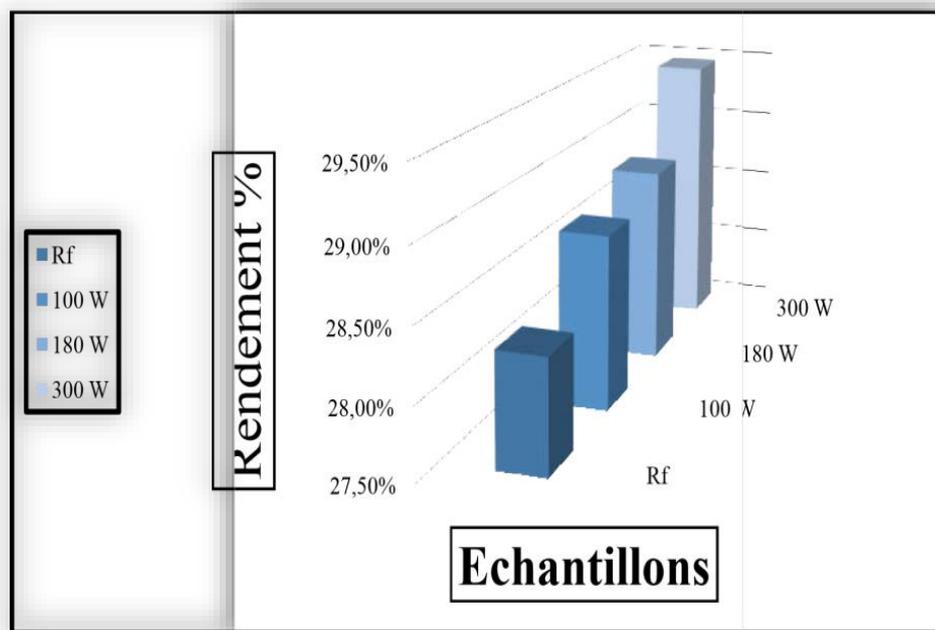


**Figure IV.3.** Diagramme représente la teneur en eau des graines de soja (Glycine max) à base humide [50].

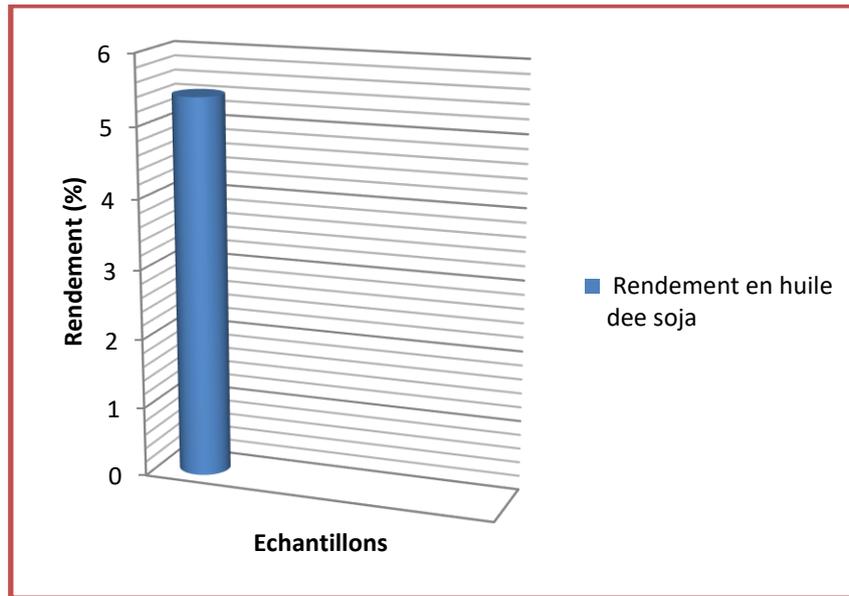
### IV.3. L'extraction des huiles

#### 1. Rendement

Le rendement maximal obtenu par Benrabah et Said, (2019) [4] est environ 29 % pour les grains de Lin, a une puissance de micro-onde, de 300W, par contre le rendement obtenu par Mellouk et Adelahine (2014) [50] est 15.54% pour les grains de Soja à 100 W (Figure : IV.4 et IV.5), d'après ces résultats, on peut dire que les grains de Lin sont plus riche en huile que les grains de Soja.



**Figure IV.4.** Rendement en huile de lin (*Linum usitatissimum*) après le séchage par micro-onde [4].



**Figure IV.5.** Rendement en huile extrait par Soxhlet pour le soja (Glycine max) [50].

D'après ces résultats, nous constatons que le rendement en huiles augmente avec l'augmentation de la puissance de la microonde, pour les grains de Lin, en revanche, le rendement en huiles diminue avec la puissance de la micro-onde pour les grains de soja.

### 2. Analyse physico-chimiques des huiles

Les propriétés physico-chimiques tels que : l'indice de réfraction, l'indice acide, l'indice d'ester...etc., constituent un moyen de vérification et contrôle de qualité d'huile.

D'après les résultats des travaux antérieurs les valeurs relatives aux propriétés physico-chimiques d'huile des graines de lin et de soja séchées par la micro-onde sont résumés dans les tableaux (IV.3) et (IV.4).

**Tableau IV.3.** Paramètres physico-chimiques d'huile des graines de lin séchées par micro-onde [4].

	<b>Référence</b>	<b>100w</b>	<b>180w</b>	<b>300w</b>	<b>CCL</b>
<b>Indice de réfraction</b>	1.448	1.438	1.438	1.448	1472-1.4750
<b>Ph</b>	6.03	6.37	6.37	6.27	-
<b>Indice d'acide (mg KOH/g d'huile)</b>	0.0112	0.0112	0.0056	0.0056	-
<b>Indice d'ester (mg KOH/g d'huile)</b>	280.5	112.2	100.98	84.15	-
<b>Indice de saponification (mg KOH/g d'huile)</b>	280.5112	112.2112	100.9856	84.1556	187-197

**Tableau IV.4.** Propriétés physico-chimiques d'huile de soja (Glycine max)[50].

Indice	<b>100 W</b>	<b>180w</b>	<b>300 W</b>	<b>Norme codex</b>
<b>IA</b>	3.66	4.48	4.48	4
<b>IS</b>	173.91	314.16	129.03	189-195
<b>IE</b>	171.67	309.68	125 .37	

Les résultats relatifs aux paramètres physico-chimiques des huiles, de grain de Lin et de Soja sont présentés dans les tableaux (IV.3 et IV.4).

**Indice de réfraction**

D'après les résultats obtenus par Benrabah et Said, (2019) [4], nous remarquons, que les valeurs de l'indice de réfraction et de pH, n'ont pas une variation significative à différente puissance de la micro-onde (100 à 300W).

**Indice d'acide**

L'indice d'acide, indique la pureté de l'huile, lorsqu'il augmente, cela signifie que l'huile est détériorée, pour les grains de Lin, Les résultats rapportés par Benrabah et Said, (2019) [4], montre que l'indice d'acide diminue avec l'augmentation de la puissance de micro-onde et se stabilise a la puissance 180W à une valeur de 0.0056. Par contre les résultats

obtenus par Mellouk et Adelahine, (2014) [50] montre que l'indice d'acide augmente légèrement avec la puissance de la micro-onde et se stabilise à 4.48, ce qui conforme aux normes de codex.

Ce qui marque une valeur nutritif très importante dans l'alimentation de notre huile.

### **Indice d'ester et saponification**

Nous remarquons, d'après les résultats obtenus par Benrabah et Said, (2019) [4], une diminution des valeurs de l'indice de saponification, et cette diminution correspond aux valeurs des indices d'acidité enregistrées. En effet la modification de la composition de l'huile suite à l'application des puissances de séchage par micro-onde aura une incidence directe sur les propriétés physico-chimiques de la substance. En revanche, Mellouk et Adelahine, (2014). [50], ont obtenu des résultats conformes aux normes, pour l'indice de saponification, à une puissance de 100 w de la microonde, avec une valeur de 173.67.

L'indice d'ester le plus bas est obtenu à une puissance de 300 w, pour Benrabah et Said, (2019) [4] et Mellouk et Adelahine, (2014) [50], avec des valeurs de 84.15 et 125.37 respectivement.

La détermination des propriétés physico-chimiques tel que l'indice de réfraction, indice d'acide, pH et l'indice d'ester et saponification, nous permet de caractériser la qualité de huile de lin et de soja.

### **IV.4. Analyse de chromatographique des acides gars**

La valeur nutritionnelle est déterminée selon deux critères, le taux protéique et la composition en acides gras insaturés. Les tableaux (IV.5 et IV.6), rapportent la composition chimique en acides gras pour les grains de Lin et de Soja.

**Tableau IV.5.** Analyse des acides gras de l'huile de lin par CPG [4].

Acide gras	Dénomination	Echantillon Référence	Echantillon 100W	Echantillon 180W	Echantillon 300W
C14 :0	Acide Myristique	0.04	0.04	0.03	*
C16:0	Acide palmitique	6.18	6.10	5.8	6.07
C16:1 $\omega$ 9	Acide Palmit-oleique	0.14	0.15	0.14	0.14
C18:0	Acide stéarique	5.01	4.81	5.11	5.03
C18:1 $\omega$ 9	Acide oléique	20.99	20.85	21.25	20.99
C18: 2 $\omega$ 6	Acide linoléique	15.86	15.73	15.88	55.59
C18:3 $\omega$ 3	Acide linoléique	51.48	52.00	51.61	54.99
C20:0	Acide arachidique	0.14	0.15	0.13	0.15
C20:1 $\omega$ 9	Acide béhenique	0.12	0.11	Tr	Tr

**Tableau IV.6.** Composition moyenne en acide gras de l'huile de Soja [50].

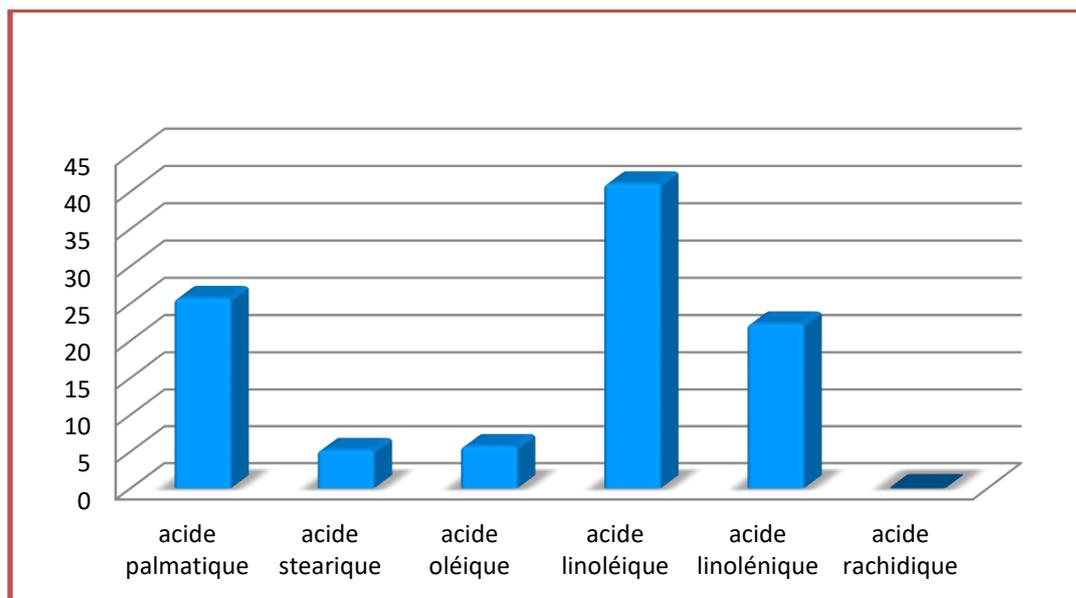
Acide gras	Avant séchage	Soja P=100W	Soja 180W	Soja P=300W.
<b>Acide palmitique (C16 :0)</b>	25.69%	24.82%	25.80%	24.77%
<b>Acide stéarique (C18 :0)</b>	5.21%	5.44%	5.28%	4.92%
<b>Acide oléique (C18 :1)</b>	5.73%	4.53%	5.87%	5.07%
<b>Acide linoléique (C18 :2)</b>	41.07%	41.32%	41.22%	41.72%
<b>Acide linoléique (C18 :3)</b>	22.27%	22.92%	21.81%	22.21%
<b>Acide arachidique (C20 :0)</b>	Trace	0.67%	-	1.29%

Le profil chromatographique des acides gras des grains de Lin, obtenu par Benrabah et Said, (2019), révèle, que les acides gras essentielles à longues chaînes sont élevés à une puissance de micro-onde de 300 W, avec 54.99% et 55.59% pour l'acide linoléique C18 :3 et linoléique C18 :2 respectivement, par ailleurs, l'acide oléique C18 :1 est élevé à une puissance de 180W avec une valeur de 21.25%.

Cette teneur considérée comme élevée par rapport à celle obtenue aux puissances 100 et 180w, peut être expliquée par l'influence de l'énergie absorbée par les graines. Cette énergie peut avoir une conséquence, en plus de l'évaporation de l'eau, sur l'éclatement des cellules végétales des graines (les oléosomes).

Les Résultats obtenus par Mellouk et Adelahine,(2014),révèlent que l'acide linoléique C18/2 est obtenu à une puissance de 300W avec une valeur de 41.72%, alors que la valeur maximal est obtenue à 100 w pour l'acide linoléiqueC18 :3 avec une valeur de 22.92%,l'acide oléique est faible pour les grains de Soja par rapport aux grains de Lin avec une valeur 5.87% à une puissance de 180W. Ces résultats sont similaires à la littérature.

Les résultats concernant la composition en acide gras de l'huile de soja sont illustrés dans la figure (IV.6).



**Figure IV.6.** Composition en acide gras de l'huile de soja (Glycine max)[50].

### IV.5. Détermination du taux protéiques

Les résultats des travaux antérieurs relatifs aux taux des protéines pour les deux graines (graines de lin et de soja), sont présentés dans les tableaux (IV.7 et IV.8).

**Tableau IV.7.** Taux des protéines des graines de lin après avant et après le séchage [4].

	Référence	Séchage à 100w	Séchage à 180w	Séchage à 300w
<b>Concentration moyen des protéines (<math>\mu</math>L)</b>	0.282	0.1766	0.116	0.15233
<b>% Massique</b>	28.20%	17.66%	11.60%	15.23%

**Tableau IV.8.**Taux de protéine dans le soja [50].

	<b>Avant le séchage</b>	<b>100W</b>	<b>180W</b>	<b>300W</b>
<b>Concentration de protéines (mg /ml)</b>	406	40	44	42
<b>Absorbance</b>	0.124	0.124	0.133	0.130

D'après les résultats du tableau (IV.7) obtenus par, Benrabah et Said, (2019) [4], nous remarquons que le taux protéique élevé est obtenu à puissance de micro-onde de 100 w, avec une valeur de 17.66%. Par contre Mellouk et Adelahine, (2014) [50] ont le taux en protéines élevé à la puissance de 180w, avec une concentration de 44 mg/ml en protéines.

Les taux de protéine observés aux puissances 180W et 300W sont liés à la réduction du taux d'humidité des graines suite à l'évaporation de l'eau.

On peut lire d'après les résultats obtenus par Mellouk et Adelahine, (2014) [50] que :

Les graines de soja correspondent à la quantité de protéine de 50 % de poids sec de soja est utilisé en alimentation humaine, c'est une légumineuse à une haute qualité nutritive.

# Conclusion générale

### Conclusion générale

L'étude comparative des travaux antérieurs sur l'influence de séchage par micro-onde sur la valeur nutritionnelle des deux graines Lin (*Linum usitatissimum*) et Soja (*Glycine max*), à montrer :

- Les rendements en huiles après le séchage pour les grains de Lin est environ 29 %, a une puissance de micro-onde de 300W, par contre le rendement obtenu pour les grains de Soja est 15.54% pour les grains de Soja à 100 W. La valeur nutritionnelle est exprimée en teneur en acides gras essentiels et le taux protéique des grains oléagineux (Lin et Soja).
- L'analyse par CPG des huiles extraites des graines séchées par micro-onde a conduit à la détection des principaux constituants des acides gras essentiels, pour le Lin 54.99% et 55.59% pour l'acide linoléique C18 :3 et linoléique C18 :2 respectivement et pour les grains Soja, 22.92 % et 41.72%, pour l'acide linoléique C18 :3 et linoléique C18 :2 respectivement,
- Le taux protéique élevé pour les grains de Lin est obtenu à puissance de micro-onde de 100 w, avec une valeur de 17.66%. Par contre les grains de Soja, ont le taux en protéines élevé à la puissance de 180w, avec une concentration de 44 mg/ml en protéines.
- Les taux de protéine observés aux puissances 180W et 300W sont liés à la réduction du taux d'humidité des graines suite à l'évaporation de l'eau.

En outre, on peut conclure que le séchage à des avantages de point de vue économique, il permet de conserver les grains oléagineuses pour long durée, par contre il a un inconvénient sur la valeur nutritionnelle par dégradation des acides gras et les protéines.

En perspective, il faut rechercher la puissance optimale avec le temps de séchage par micro-onde pour préserver la valeur nutritionnelle des grains oléagineux.

# Références bibliographiques

## Références bibliographiques

- [1] : M.A.A.MATALLAH, « Marché Mondial des Oléagineux ». Analyste des marchés. Institut National Agronomique (INA) Alger, Magistère 2006.
- [2] : L.BOGAERTE, « Etude et modélisation du pressage continu des graines oléagineuses », Thèse de doctorat, Génie des procédés industriels et développement durable : transformation intégrées de la matière renouvelable, Université de technologie Compiègne, France. Consulté le 08 Décembre, 2017.
- [3] : W.PATRICK, « Table alimentaires des oléagineux », les bienfaits des noix et oléagineux. TheGoodfit by Fitdium, 4 juin 2020.
- [4] : H.BENRABAH et N.SAID, « influence de séchage sur la valeur nutritionnelle des grains de lin (*linum usitatissimum*) », faculté des sciences et technologies, Université Djilali BounaamaKhemis Miliana, Algérie, 2019.
- [5] : Terre Univia, Interprofession des huiles et protéines végétales, « Graines Oléagineuses », 10 juillet 1975.
- [6] : R.SAVOIRE, « Etude multi-échelles de la séparation solide-liquide dans la trituration du lin oléagineux », Thèse de Doctorat. Faculté des Génies des procédés industriels, Université de Technologie Compiègne UTC, France, 24 septembre 2008.
- [7]:Fikru J. Haile, Leon G. Higley,James E. Specht, and Stephen M. Spomer, «Soybean Leaf Morphology and Defoliation Tolerance », Agronomy journal , united states, vol 90, may-june 1998.
- [8]:J.M.S. RENKEMA, «Formation, structure and rheological proprieties of soyprotein gels», Université de Wageningen, pays-Bas, 20 Novembre 2001.
- [9]:P.ELIAS HADDAD, “Sécurité alimentaire et environnement dans l’agroalimentaire”, Institut biologique de l’Agence technologique de l’agroalimentaire de l’État de São Paulo, Brésil, 2014.
- [10]: Description botanique du lin (*Linum usitatissimum*), Bio enligne .com.
- [11]: Z.WONG, « the génome of flax (*Linum usitatissimum*) assembled de novo from short shotgun sequence reads », the plant journal, vol 72 (3), pages 461-473, 2012.
- [12]: V.HEUZE et G.TRAN, « Soybean (general) », feedipedia , a program by INRA, CIRAD, AFZ and FAO, last updated on August 3, 2016. 10:37.
- [13]: Groupe spécial sur les produits de base de la CNUCED, « soja », Nations Unies CNUCED,

New York et Genève, 2016.

[14] : La biologie du *Linum usitatissimum* (lin), Gouvernement du Canada, Canada, 05-15-2019.

[15] : « FAOSTAT, culture : production-quantité- produit : soja », 12 juin 2020.

[16]: Lin, « la culture du lin dans les champs en 5 étapes », France, 23 avril 2015.

[17]: LUICE de la Héronnière, « Ecologie, OGM, santé... tout savoir sur soja », 12/11/2018.

[18]: L.FRITCH, « Innovation ; le lin, du champ à la peche, de la ruralité et de l'aménagement du territoire », n°1549, juillet- aout- septembre 2011.

[19]: J.MURYEL, « Les principaux producteurs de soja dans le monde », du Brésil à l'Inde l'exploison mondial de la culture du soja, 6 juin 2013.

[20]: Calcul de la fertilisation azotée, « lin oléagineux, d'hiver et de printemps », fiche culture, COMIFER, JUIN 2012.

[21]: M.PIERRE FABRE, «Au fil du Lin, tradition et modernité», institut Klorané (protéger, explorer, éduquer), France, 1994, code 492107.

[22]: M.MARK, « Modern applications for an ancient Bean: soybeans and prevention and treatment of chronic disease», the journal of Nutrition, Vol 125, Issue suppl-3, mars 1995, pages 5675-7695.

[23]:J.HUBERT, (2006). « Caractérisation biochimique et propriétés biologiques des micronutriments du germe de soja – Etude des voies de sa valorisation en nutrition et santé humaines ». Thèse de doctorat, École doctorale des Sciences Ecologiques, Vétérinaires, Agronomiques et Bioingénieries, Qualité et sécurité des aliments, Toulouse. Consulté le 18 Décembre, 2012.

[24]: L.DAVIDSSON, P.GALAN, P.KASTENMAYERK, F.CHEROUVRIER, M.A.JUILLERAT, S.HERCBERG & R. F.HURRELL, (1994). « Iron bioavailability studied in infants: the influence of phytic acid and ascorbic acid in infant formulas based on soy isolate. *Pediatr. Res* ».pp. 36-38. Consulté le 20 Octobre, 2013

[25]:C.I.HALL, M.C.TULBEK, Y.XU, Flaxseed. «Advances in Food and Nutrition Research». 51, (2006).

[26]: B.D.OOMAH, E.O.KENASCHUK, G.MAZZA, Tocopherols in flaxseed. «Journal of Agricultural and Food Chemistry». 45, (1997).

[27]: A.ESCARPA & M.C.GONZALEZ, (2001) An overview of analytical chemistry of phenolic compounds in foods. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 31.

[28]: C.ELIASSON, A.KAMAL-ELDIN, R.ANDERSSON & P.ÅMAN, (2003), «High-performance liquid chromatographic analysis of secoisolaricresinoldiglucoside and

hydroxylcinnamic acid glucosides in flaxseed by alkaline extraction». *Journal of Chromatography A*, 1012.

[29]: I.E. POPOVA, C. HALL & A. KUBATOVA, (2009), « Determination of lignans in flax seed using liquid chromatography with time-of-flight mass spectrometry ». *Journal of Chromatography A*, 1216.

[30]: H-M. BAU, C. VILLAUME, F. GIANNAGELI, J.-P. NICOLAS, & L. MEJEAN, (2001). « Optimisation du chauffage et valeurs nutritionnelle et fonctionnelle des protéines de soja ». *Cahiers de nutrition et de diététique*, 36(2), pp. 96-102. Consulté le Janvier 16, 2013.

[31]: C. CHATENET, (2007). « Le soja, une plante étonnante, un aliment incontournable ». *Actualités pharmaceutiques*(469), p. 37. Consulté le Décembre 14, 2012.

[32]: J.-M. LECERF, (1995). « L'intérêt nutritionnel du soja ». *Nutrition clinique et métabolisme*(9), p. 137. doi : 10.1016/S0985-0562(05)80091-3.

[33]: F. COUPLAN, (2011). « Guide nutritionnel des plantes sauvages et cultivées ». Paris: Sophie Daguin. Consulté le 16 Janvier, 2013.

[34]: C. BONAZZI et J.-J. BIMBENET, « Séchage des produits alimentaires », *Techniques de l'ingénieur, traité Agroalimentaire*, F3000-1. Juin 2003.

[35]: C. ERTEKIN and O. YALDIZ, « Drying of egg plant and selection of a suitable thin layer drying model ». *Journal of food engineering* 63 (3):349-359, 2009.

[36]: J. VASSEUR, « Séchage: principes et calcul d'appareils, séchage convective par air chaud » (partie 1). *Techniques de l'ingénieur. Génie des procédés*, 2009.

[37]: Z. SARA, « influence des techniques de séchage sur la solubilité des protéines de levure 'saccharomyces cervisiae' produite dans un milieu à base de datte », Université El hadj Lakhder, Batna, Algérie, 2009.

[38]: L.V. KAMBLE and D.R. PANAGAVHANE, « Neural network optimization by comparing the performances of the training functions-prediction of heat transfer from horizontal tube immersed in gas-solid fluidized bed ». *International journal of heat and Mass transfer* 83 (0): 337-344.

[39]: A. BASMAN and S. YALCIN, « Quick-boiling noodle production by using infrared drying », *Journal of food Engineering* 106(3):245-252, 2001.

[40]: M. GIAT and C. GROUHELL, « problème de séchage en milieu poreux, Application à un toit tuiles de terre cuite », *Revue Générale de thermique*, N° 324, pp.11-18, 1988.

[41]: S.C. KARAN and S. ROMANTHA, « Microwave food processing- A review », *Food Research international*, 52(1): 243-261, 2013.

- [42]:Z.SOFIANE, « Valorisation des pelures de tomates séchées en vue de leur incorporation dans la margarine», Département de technologie alimentaire, Université M'hamedBougara – Boumerdes, Algérie.
- [43]: T.N.CALAVACHE, « Obtention of dietary fiber enriched fractions from peach bagasse using ethanol pre-treatment and microwave drying », LWT-Food science and technology 62(2):1169-1176.
- [44]: I.YALMAZ, M.ARICI and T.GUMUS, «Changes of microbiological quality in meatballs after heat treatment», 221(3-4): 281-283, 2005.
- [45]: A.GOWEN, N.ABU6GHANNAN, J.FRIAS and J.OLIVERIA, « Modeling dehydration and rehydration of cooked soybeans subjected to combined microwave hot-air drying», Innovative food science & Emerging technology 9,129-137, 2008.
- [46]: C.BOUNAZZI and E.DUMOULIN, «Quality changes in Food materials as influenced by drying processes». Modern dryingtechnology, 3, 2011.
- [47]:C.BOUNAZZI and J-J. BIMBENET, «Séchage des produits alimentaires principes», Technique de l'ingénieur Agroalimentaire 2, F3000.3001-F3000.3014, 2003.
- [48] : P.MAFART et T.TOME, « les procédés physiques de conservation », Génie industriel alimentaire, 1991.
- [49] : C.BONAZZI et J-J.BIMBENET, «Séchage des produits alimentaires : appareils et applications », Techniques de l'ingénieur Agroalimentaire 2, 2008.
- [50] : M.MELLOUK et A.ADELAHINE, « influence de séchage sur la valeur nutritionnelle des grains de Soja (*Glycine max*) », faculté des sciences et technologies, Université Djilali BounaamaKhemis Miliana, Algérie, 2014.