



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريريج  
Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi B.B.A  
كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الأرض والكون  
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers  
قسم العلوم البيولوجية  
Département des Sciences Biologiques



# Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine des Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences biologique

Spécialité : Biochimie

## Intitulé :

**Étude bibliographique de l'activité antioxydante des  
graines de lin**

### Présenté par :

Djerrad yousra & Madani chaima

Soutenu le 12 / 06/ 2024, Devant le Jury :

	Nom & Prénom	Grade	Affiliation / institution
Président :	M <sup>me</sup> . Boumerfeg Sabah	Pr.	Université de Bordj Bou Arreridj
Encadrant :	M <sup>me</sup> . Nasri Meriem	MCA	Université de Bordj Bou Arreridj
Examineur :	M <sup>me</sup> . Benouadah Zohra	MCB	Université de Bordj Bou Arreridj

Année Universitaire 2023/2024

# Remerciements

Au terme de notre travail, nous tenons à exprimer nos remerciements les plus sincères et les plus profonds, tout d'abord à ALLAH le tout puissant de nous avoir accordé patience, courage et volonté afin de réaliser et mener à terme ce modeste travail.

Nous remercions **Pr. Boumerfeg Sabah** avec nos profondes gratitude de l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail et d'avoir accepté de le juger.

Nous remercions notre promotrice **Dr. Nasri Mereim** pour son aide précieuse et ses conseils dans la direction de notre travail.

Nous remercions **Dr. Benouadah Zohra** avec nos profondes gratitude de l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail et d'avoir accepté de l'examiner.

À tous les esprits ouverts qui ont contribué, de loin ou de près, à la réalisation de ce modeste travail.

الى أهلنا في غزة.

نعتذر اليكم يا أشرف الناس وأعز الناس وأكرم الناس

.آواكم الله، حفظكم الله، نصركم الله، ثبّتكم الله، أيّدكم الله. نستودعكم الله، والسلام عليكم

ورحمة الله

**Chaima et Yousra**

# Dédicaces

الحمد لله حمدا كثيرا طيبا مباركا فيه

À l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de Bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, à toi, **mon père**.

À la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; **maman** que j'adore.

À ma sœur et ma force **Amina** qui m'a toujours aidé et m'encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et ces enfants **Djawad** et **Asil**.

À mes frères **Abbes**, **Hamza**, **Akrem** et ma petite sœur **Rania**, ma belle-sœur **Chaima** et ses filles **Meriem** et **Ghaza** et toute ma famille.

À mes belles amies et sœurs, que j'aime : **Amina**, **Ahlem**, **Hadjer** et **Yasmin**

À celle qui est loin de mes yeux et proche de mon cœur, chère sœur **Meddour Asma**.

À la plus belle personne dans ma vie, mon bras droit **Affene Taouba**.

À mon sauveur à l'université qui est toujours présent, **Torki Aymen**.

À mon binôme et à ma sœur **Yousra**, avec qui j'ai partagé mes années universitaires et ce modeste travail qui n'a pas toujours été facile.

*Chaima*

# Dédicaces

الحمد لله الذي هداني لهذا وما كنت لأهتدي لولا أن هداني الله الحمد لله حمدا كثيرا  
طيبا مباركا فيه.

أود أن أهدي هذا العمل المتواضع إلى والدي الكريمين جراد عمار وبن الشيخ  
العمرية، اللهم أعني على برهما وأجزل لهما الخير والمغفرة.

إلى اصدقائي الذين كانوا خلال السنين العجاف سحابا ممطرا، أنا ممتنة.

إلى كل من مات لتحيا أرضه.

اللهم انفعني بما علمتني واجعله حجة لي لا علي

يسرى



## Table des matières

<b>Introduction</b> .....	1
<b>Chapitre I : Présentation de <i>linum usitatissimum</i> L.</b> .....	
1. <b>Historique</b> .....	2
2. <b>Description botanique</b> .....	2
3. <b>Classification scientifique et nomenclatures</b> .....	3
4. <b>Répartition géographique</b> .....	4
5. <b>Culture et récolte</b> .....	4
6. <b>Utilisation Traditionnelle</b> .....	4
7. <b>Composition chimique</b> .....	5
7.1. <b>Métabolite primaire</b> .....	5
7.1.1. <b>Protéines</b> .....	5
7.1.2. <b>Lipides</b> .....	5
7.1.3. <b>Glucides</b> .....	6
7.2. <b>Métabolite secondaire (Les polyphénols)</b> .....	6
7.2.1. <b>Lignanes</b> .....	6
7.2.2. <b>Acides phénoliques</b> .....	7
7.2.3. <b>Flavonoïdes</b> .....	7
7.2.4. <b>Tanins</b> .....	7
8. <b>Effets Pharmacologique</b> .....	7
9. <b>Alimentation animale</b> .....	8
9.1. <b>Production avicole</b> .....	8
9.2. <b>Alimentation des ruminants</b> .....	9
10. <b>Utilisation Cosmétique</b> .....	10
11. <b>Industrie de lin</b> .....	10
12. <b>Toxicité de lin</b> .....	10
<b>Chapitre II : Stress oxydant</b> .....	
1. <b>Les radicaux libres</b> .....	12
2. <b>Les espèces réactives de l'oxygène</b> .....	12
2.1. <b>Production endogène des ROS</b> .....	12
2.1.1. <b>Phosphorylation oxydative</b> .....	13
2.1.2. <b>Oxydation de NADPH</b> .....	13
2.1.3. <b>Réaction de fenton et Haber-Weiss</b> .....	14
2.1.4. <b>La myéloperoxydase</b> .....	14
2.1.5. <b>Cytochrome P450</b> .....	16
2.1.6. <b>La xanthine oxydase (XO)</b> .....	16

2.1.7. Réticulum Endoplasmique (RE).....	16
3. Les espèces réactives de l'azote (RNS).....	17
3.1. Production endogène des RNS.....	17
4. Production exogène des ROS et RNS.....	17
5. Les rôles biologiques des radicaux libres.....	18
6. Le système antioxydant.....	18
6.1. Enzymatique .....	18
6.2. Non enzymatique .....	19
7. Le stress oxydatif .....	20
8. Mécanismes du stress oxydatif .....	20
8.1. L'oxydation des lipides.....	20
8.2. L'oxydation des protéines .....	21
8.3. L'oxydation de l'ADN .....	21
<b>Chapitre III : Activité antioxydante des graines de lin .....</b>	
<b>Activité antioxydante des graines de lin .....</b>	<b>22</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>25</b>

**Liste des tableaux :**

Tableau 1: *classification scientifique de linum usitatissimum* l (Diederichsen et Richards, 2003)3



## Liste des figures:

<b>Figure 1:</b> Grains et fleures de <i>linum usitatissimum</i> .....	3
<b>Figure 2:</b> Principaux pays producteurs de lin .....	4
<b>Figure 3:</b> Structure de SDG et SECO .....	7
<b>Figure 4:</b> Principales sources cellulaires de formation de ROS .....	12
<b>Figure 5:</b> Transport des protons et formation de ROS lors de la phosphorylation oxydative .....	13
<b>Figure 6:</b> Génération et réactions d'intermédiaires redox de MPO.....	15
<b>Figure 7:</b> Formation de différents RNS .....	17
<b>Figure 8:</b> Systèmes antioxydants enzymatiques et non-enzymatiques du corps contre les dommages des radicaux libres .....	20

## **Liste d'abréviation:**

**ABTS:** 2,2'-azino-bis [3-éthylbenzothiazoline-6-acide sulphonique]

**ADN:** acide désoxyribonucléique

**AG:** acides gras

**ALA :** l'acide alpha-linolénique

**CAT:** catalase

**DPPH:** radical 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl

**FRAP:** pouvoir antioxydant réducteur de fer

**GSH:** glutathion

**MPO:** myéloperoxydase

**NADPH:** nicotinamide adénine dinucléotide phosphate

**NOX:** NADPH oxydases

**RE:** Réticulum Endoplasmique

**ROS:** radicaux libres d'oxygène

**SDG:** diglucoside de secoisolariciresinol

**SECO:** Le secoisolariciresinol

**TPC:** composés phénoliques totaux

**XO:** xanthine oxydase

# Introduction



## Introduction

Les radicaux libres existent dans le système biologique et proviennent d'un large éventail de sources. Lorsque les radicaux libres dépassent la capacité antioxydante des cellules, un stress oxydatif apparaît. Dans ces conditions, les radicaux libres peuvent oxyder la plupart des molécules biologiques cruciales telles que les lipides, les protéines et les acides nucléiques, déclenchant des maladies dégénératives qui entraînent la mort ou la transformation des cellules. Afin de mettre un terme à la formation des radicaux libres et à leurs effets néfastes, les cellules ont développé un large éventail de défenses antioxydantes. Les antioxydants, enzymatiques et non enzymatiques, protègent et inhibent les cellules des dommages oxydatifs en décomposant les peroxydes, en piégeant les radicaux libres et en séquestrant les métaux de transition (**Kasote, 2013**).

Récemment, il y a un intérêt croissant à trouver des antioxydants naturels à partir de matériaux végétaux pour remplacer les matériaux synthétiques tels que l'hydroxytoluène butylé, qui sont soupçonnés d'être responsables des dommages au foie et de la carcinogénèse. De nombreuses études ont révélé que les antioxydants obtenus à partir des plantes sont susceptibles de réduire l'incidence de certains types de cancers et de maladies chroniques telles que les maladies cardiovasculaires. L'une de ces plantes est la graine de lin (**Mzid et al., 2017**).

Le lin (*Linum usitatissimum*) est cultivé pour l'obtention d'huile et de fibre depuis l'antiquité. Il appartient au genre *Linum* et à la famille des Linaceae. Il est utilisé comme ingrédient alimentaire et laxatif naturel et est également une source précieuse de composés bioactifs (**Yaqoob et al., 2021**).

Les graines de lin est reconnue dans le monde entier comme un aliment pour la santé en raison de son abondance en divers nutriments et composés bioactifs tels que l'huile, les acides gras, les protéines, les peptides, les fibres, les glucides, le mucilage et les micronutriments (**Mueed et al., 2022**). Et des composés phénoliques tels que les lignanes, les acides phénoliques, les flavonoïdes, les phénylpropanoïdes et les tanins (**Kasote, 2013**). Ces composants attribuent à la graine de lin une multitude de propriétés bénéfiques qui en rendent possible l'utilisation dans diverses applications, telles que les nutraceutiques, les produits alimentaires, les cosmétiques et les biomatériaux (**Mueed et al., 2022**).

Des études ont révélé qu'en plus d'être une source de nutrition, les graines de lin peuvent avoir des effets bénéfiques sur la santé dans le cadre de la prévention et du traitement de diverses maladies et troubles (**Tanwar et Goyal, 2021**). Le but de cette étude bibliographique est de

caractériser les divers composants contenus dans les graines de lin et d'examiner les recherches concernant le potentiel antioxydant de ces graines.

**Chapitre I : Présentation de *linum*  
*usitatissimum* L.**

## 1. Historique

Depuis l'Antiquité, les graines de lin sont cultivées et utilisées dans de nombreux aspects de la vie quotidienne. Sur le plan archéologique, son utilisation est décelable à la préhistoire, il y a environ 10 000 à 12 000 ans. Elle a été utilisée dans le sud de la Mésopotamie entre 5200 et 4000 avant J.-C., tandis que les Babyloniens l'ont cultivée dès 3000 avant J.-C. Elle a été identifiée pour la première fois dans l'est de la Turquie pour fabriquer un tissu appelé lin, 6000 avant J.-C. Les colons ont été les premiers à introduire la graine de lin ou le lin aux États-Unis, principalement pour la fibre des vêtements. La graine de lin a été principalement utilisée pour la fabrication de tissus et de papiers jusqu'aux années 1990. Il existe des preuves documentées de la présence de tissus de lin dans les anciennes tombes égyptiennes et dans les chambres funéraires babyloniennes, ainsi que de vêtements en lin portés par les grands prêtres juifs. L'huile obtenue à partir de la graine était utilisée dans l'industrie de la peinture, et la farine servait d'aliment pour les animaux et d'engrais (**Tanwar et Goyal, 2021**).

## 2. Description botanique

Le lin est une plante dicotylédone qui se reproduit par autofécondation. Elle fait partie de la famille des Linaceae et du genre *Linum*, c'est une plante annuelle, bisannuelle ou vivace, très fine et peu enracinée (racine pivotante). Elle a des tiges élancées et fibreuses, des feuilles lancéolées à trois nervures, mesurant jusqu'à 4 cm de long et 4 mm de large, et des fleurs bleues de 3 cm de diamètre. Les fruits sont des capsules sphériques qui renferment deux graines par loge (au nombre de cinq). Les graines de lin sont plates et ovales, avec une pointe à une extrémité (figure 1). Elles ont une surface lisse et brillante et une couleur brune foncée. Elles ont une texture croquante et moelleuse et un goût de noisette (**Beroual, 2014**).

Il existe aussi des espèces de lins sauvages, en plus du lin cultivé. Le lin jaune, *Linum flavum*, est une espèce bisannuelle à fleurs jaunes, que l'on trouve en Europe centrale, en Europe de l'Est et dans le nord de l'Italie. Il a une tige simple et une fleur à cinq pétales jaunes. D'autres lins sauvages sont : *Linum angustifolium*, probablement l'ancêtre du lin cultivé ; *Linum album*, un lin à fleurs blanches originaire d'Iran ; *Linum grandiflorum*, un lin d'origine africaine à grandes fleurs rouges ; et *Linum perenne*, un lin qui forme des touffes arrondies, présent en Europe et en Asie tempérée. Il existe des variétés ornementales de *Linum grandiflorum* et *Linum perenne*. Il y a aussi d'autres espèces de lin à fleurs jaunes, comme *Linum nodiflorum* (**Beroual, 2014**).





**Figure 1:** Grains et fleurs de *linum usitatissimum* (Shekhara *et al.*, 2020 ; Yang *et al.*, 2021)

### 3. Classification scientifique et nomenclatures

Le lin, également connu sous le nom de graine de lin. Le nom botanique *Linum usitatissimum* a été donné par Linnaeus dans son livre “Species Plantarum”. Les noms communs flax et linseed sont utilisés en Amérique du Nord et en Asie, et elle est connue en arabe sous le nom زريعة الكتان ou بذور الكتان (Jhala et Hall, 2010). Le titre latin de la graine de lin implique « très utile » (Kausar *et al.*, 2024).

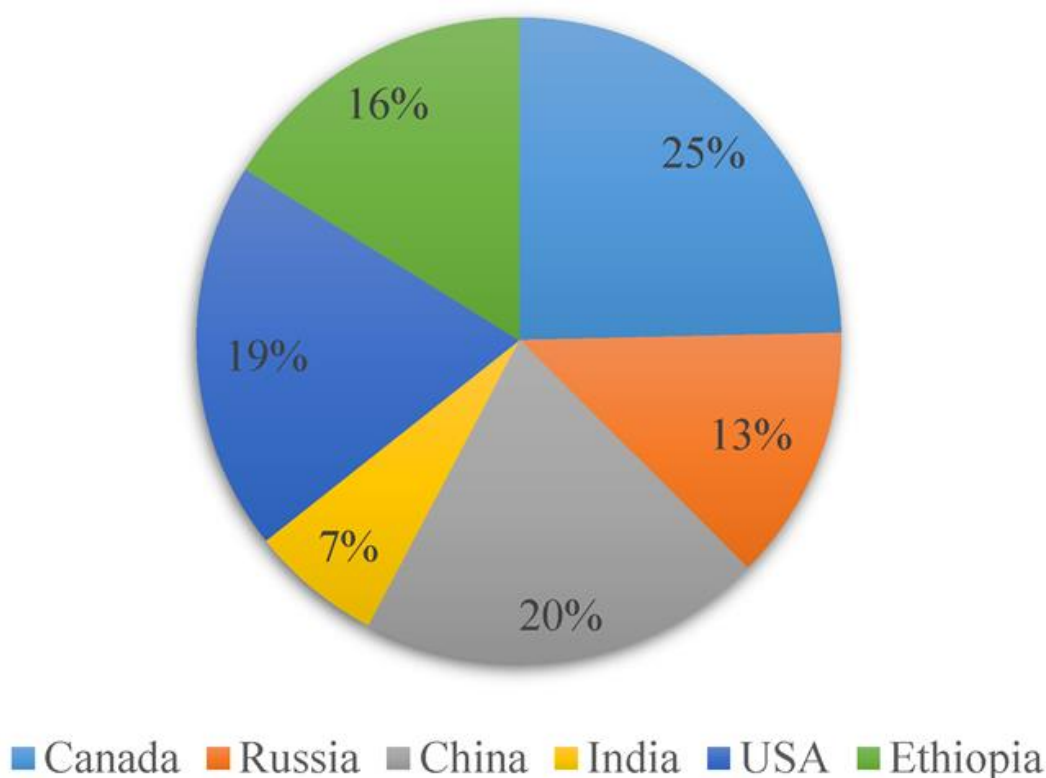
C’est une plante appartenant à la famille des Linacées (table1) (Tanwar et Goyal, 2021). Le genre *Linum* est composé d’environ 230 espèces, qui sont divisées en six sections en fonction des caractéristiques morphologiques *Linum*, *Linastrum*, *Dasylinum*, *Syllinum*, *Cliococca* et *Cathartolinum* (Rizvi *et al.*, 2022).

**Tableau 1:** classification scientifique de *linum usitatissimum* L. (Diederichsen et Richards, 2003).

Classification	Nom scientifique
Règne	Plantae
Sous règne	Tracheobionta
Division	Ptéridophyte
Sous-division	Angiospermae
Classe	Dicotyledoneae
Sous-classe	Rosidae
Ordre	Geraniales
La famille	Linaceae
Tribu	Linoideae
Genre	<i>Linum</i>
Espèce	<i>Linum usitatissimum</i> L.

#### 4. Répartition géographique

La plante est originaire d'Asie occidentale et de la région Méditerranéenne (**Ganorkar et jain, 2013**). Les principales zones de culture du lin se situent dans l'hémisphère nord (**Tang et al., 2021**). Avec une production annuelle totale d'environ 2,92 millions de tonnes, les graines de lin sont produites dans plus de 50 pays (**Tanwar et Goyal, 2021**). Les principaux pays producteurs de lin sont Canada, l'Inde, la Chine continentale, les États-Unis et l'Éthiopie. Canada et la Chine continentale sont les plus grands producteurs et exportateurs mondiaux représentant plus de 30% des échanges de graines de lin (**figure2**) (**Tang et al., 2021**).



**Figure 2:** Principaux pays producteurs de lin (**Mishra et Awasthi, 2020**).

#### 5. Culture et récolte

Les graines de lin sont en effet une culture de rotation bénéfique, car elles ont des besoins réduits en azote et n'appauvrissent pas le sol. Elles poussent dans une terre légère et fraîche. La récolte du lin se fait à maturité optimale : elles sont arrachées, puis mises à sécher à l'air libre ou sous abri, avant de séparer les graines des tiges par battage. Enfin, un souffle d'air chaud achève le séchage et élimine les fibres ou les feuilles restantes (**Pierre et Lis, 2007**).

#### 6. Usage Traditionnelle

Hippocrate, le père de la médecine, recommandait la graine de lin pour soulager les douleurs abdominales en 650 av. J.-C., tandis que Théophraste la préconisait comme remède au rhume.

Le lin a été indiqué dans l'Ayurveda (1200 B.C.) pour contrôler la fatigue mentale et physique et le processus de vieillissement. Au Moyen Âge, l'huile de lin était également utilisée pour le traitement des troubles rénaux. En outre, les préparations à base de lin étaient largement utilisées comme agent de guérison, pour le traitement des troubles gastro-intestinaux et pour le traitement des maladies cardiaques, de remède contre la toux et le rhume, d'antidouleur et d'anti-inflammatoire **(Tanwar et Goyal, 2021)**.

Dans le sud de l'Inde, la graine de lin est consommée occasionnellement sous forme de chutney et est également utilisée comme matière première pour certains médicaments.

Bien qu'avant la seconde guerre mondiale, les graines de lin étaient couramment utilisées dans l'alimentation, elles ont été abandonnées par la suite. Toutefois, elle a été réintroduite en tant qu'aliment fonctionnel au cours des années 1990 **(Tanwar et Goyal, 2021)**.

## **7. Composition chimique**

La graine de lin, utilisée à la fois comme aliment quotidien et comme médicament, est riche en acide gras oméga-3, en acide alpha-linolénique, en diglucoside de secoisolariciresinol (SDG), en lignanes, en protéines de haute qualité, en fibres solubles et en composés phénoliques. La composition chimique des graines de lin dépend de la génétique, de l'environnement de culture et des conditions de traitement **(Rizvi et al., 2022)**.

### **7.1. Métabolite primaire**

#### **7.1.1. Protéines**

La plupart des protéines de la graine de lin sont stockées dans les cotylédons de la graine de lin comme principale réserve d'azote pour la germination et la post-germination de l'embryon. Les graines de lin contiennent 20 à 30 % de protéines selon l'analyse des protéines brutes. Compte tenu de l'abondance de Nitrogène non protéiné dans la graine de lin, on estime que la graine de lin ne contient que 18 % de protéines réelles. Comme la protéine de soja, la protéine de lin est riche en asparagine, en acide glutamique, en leucine et en arginine. Toutefois, les protéines de lin sont pauvres en acides aminés soufrés, à savoir la méthionine et la cystéine. Le rapport en pourcentage entre les acides aminés essentiels et les acides aminés totaux dans la protéine de lin est bien supérieur au rapport en pourcentage de 36 % pour les protéines, ce qui donne un grand potentiel pour l'utilisation de la graine de lin en tant que source de protéines **(Bekhit et al., 2018)**.

#### **7.1.2. Lipides**

Les lipides de la graine de lin sont la principale source de nutriments pour la germination des graines. Au microscope, les lipides de la graine de lin sont stockés dans des gouttelettes d'huile de 1,3 µm de diamètre, composées à 98 % de lipides neutres, à 1,3 % de protéines d'enrobage ou

oléosine, à 0,9 % de phospholipides et à 0,1 % d'acides gras libres. D'un point de vue nutritionnel, le lipide de la graine de lin est le composant chimique le plus intéressant de la graine de lin en raison de son équilibre favorable entre les acides gras polyinsaturés, monoinsaturés et saturés (**Bekhit *et al.*, 2018**). L'huile de lin contient 98 % de triacylglycérol et de phospholipides et de petites quantités d'acides gras libres (0,1 %) (Mueller *et al.* 2010). L'huile de lin est riche en AGPI (acides gras polyinsaturés) (73 %) et en acides gras saturés (9 %). L'acide  $\alpha$ -linoléique (40-60 %), l'acide linoléique (12-17 %), l'acide oléique (13-19 %), l'acide palmitique (5-8 %) et l'acide stéarique (2-4,5 %), qui sont les principaux acides gras présents dans l'huile de lin. En tant que source exclusive d'acides gras  $\omega$ -3, les graines de lin apportent de l'acide alpha-linolénique (ALA) aux régimes végétariens (**Tanwar *et Goyal*, 2021**).

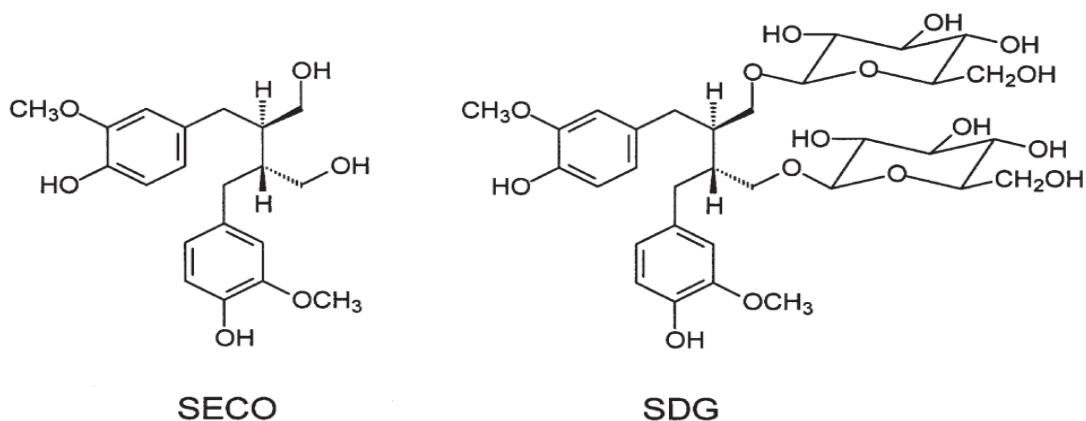
### **7.1.3. Glucides**

La coque est la principale source de glucides de la graine de lin. Les graines de lin contiennent principalement des glucides non digestibles et de faibles niveaux de glucides digestibles, généralement sous forme de sucre soluble, et la majeure partie des glucides non digestibles comprend des fibres solubles et insolubles. L'enveloppe de la graine de lin est la principale source de mucilage et est utilisée pour former un film gélatineux lorsque la graine de lin est humide. Ce mucilage représente environ 7 à 10 % de la teneur totale en glucides de l'ensemble de la graine. La lignane et la cellulose sont les parties insolubles des hydrates de carbone de la graine de lin (**Rizvi *et al.*, 2022**).

## **7.2. Métabolite secondaire**

### **7.2.1. Lignanes**

Le lignane dominant dans la graine de lin est le diglucoside de secoisolariciresinol (SDG). Le secoisolariciresinol (SECO) est l'aglycone du SDG résultant du couplage des atomes C 8 et 8' des chaînes latérales de deux groupements d'alcool coniférylique. Dans la graine de lin. Le SDG est stocké dans un ester lié à l'acide 3-hydroxy-3-méthylglutarique (HMGA) et à d'autres composés phénoliques tels que l'acide p-coumarique et les glycosides d'acide férulique pour former des oligomères de SDG d'une valeur inconnue (figure 3). Outre le SDG, des quantités moindres d'autres types de lignanes tels que le matairesinol, l'isolariciresinol, le lariciresinol et le pinoresinol ont également été identifiées dans la graine de lin (**Kasote, 2013**).



**Figure 3:** structure de SDG et SECO (Hosseinian et al., 2006)

### 7.2.2. Acides phénoliques

Les graines de lin contiennent 8-10 g/kg d'acides phénoliques totaux, ils sont soit sous forme libre et/ou liée. La plupart des acides phénoliques des graines de lin tels que les acides p-hydroxybenzoïque, trans-ferulique et trans-p-coumarique sont liés à l'ester. Parmi ces acides phénoliques, les glucosides des acides férulique et p-coumarique ont été accumulés à des concentrations élevées dans les graines de lin. En outre, des acides phénoliques tels que l'acide caféique et leurs glucosides ont également été signalés dans la graine de lin (Kasote, 2013).

### 7.2.3. Flavonoïdes

La graine de lin possède environ 0,3-0,71 g de flavonoïdes totaux par kg de graine de lin. Dans la graine de lin, les flavonoïdes se présentent sous la forme de glucosides tels que l'herbacétine 3, 8-Odiglucopynanoside, l'herbacétine 3, 7-O-diméthyléther et le kaempférol 3, 7-O-diglucopyranoside. Les diglucosides d'herbacétine (HDG) sont liés par ester à la macromolécule de lignane par l'intermédiaire de l'acide 3-hydroxy-3-méthylglutarique (HMGA) (Kasote, 2013).

### 7.2.4. Tanins

Outre les composés phénoliques susmentionnés, la présence de tanins, d'acides phénoliques et de leurs glycosides a été signalée dans la fraction N-butanol de la graine de lin (Kasote, 2013).

## 8. Effets Pharmacologique

La graine de lin a été classée parmi les "super-aliments", c'est-à-dire les aliments d'origine naturelle contenant divers composants bioactifs et présentant de nombreux avantages pour la santé. La consommation de graines de lin peut être un facteur important dans la prévention des maladies (Nowak et Jeziorek, 2023).

De nombreuses études démontrent que l'huile de lin a la capacité d'inhiber la croissance de nombreux types de cancers, tels que le cancer du côlon, la tumeur mammaire, le cancer du sein, etc., même à un stade avancé du cancer. Il a également été indiqué que l'huile de lin pouvait réduire la croissance des lignées cellulaires du cancer du sein et augmenter l'apoptose en modifiant les voies de signalisation. L'huile de lin peut également améliorer l'efficacité des médicaments anticancéreux pour inhiber la croissance de certains types de cellules cancéreuses. L'huile de lin présente une activité hépatoprotectrice grâce à l'inhibition des voies de signalisation inflammatoires (**Tang et al., 2021**).

Des études sur des animaux ont montré les avantages possibles de l'acide gras n-3 des graines de lin, en réduisant la rétention de graisse dans le foie d'animaux génétiquement obèses. Bien qu'il soit démontré que la consommation de graines de lin ne favorise pas nécessairement la perte de poids, les composés bioactifs qu'elles contiennent peuvent moduler positivement les mécanismes qui entraînent une diminution des comorbidités associées à l'obésité. Toutefois, ces effets sont controversés pendant l'allaitement (**Cardoso Carraro et al., 2012**).

En raison de sa teneur significative en acides gras oméga-3, en lignanes, en protéines et en fibres solubles, la graine de lin peut réduire le risque de maladies cardiovasculaires telles que l'athérosclérose ou les cardiopathies ischémiques. L'ingestion de graines de lin a été associée à une amélioration des taux de lipides et de lipoprotéines sériques. Les graines de lin peuvent réduire la concentration des marqueurs inflammatoires (**Nowak et Jeziorek, 2023**).

Les lignanes, dont la structure est similaire à celle des œstrogènes endogènes, peuvent influencer la concentration des hormones sexuelles chez les femmes. Les graines de lin riches en phyto-œstrogènes peuvent diminuer les symptômes de la ménopause, car elles ont montré des effets bénéfiques sur la fréquence et l'intensité des bouffées de chaleur. Une autre étude analysant l'effet des graines de lin sur les symptômes de la ménopause chez 140 femmes a montré une diminution significative des symptômes de la ménopause et une augmentation de la qualité de vie chez les femmes consommant des graines de lin (**Nowak et Jeziorek, 2023**).

## **9. Alimentation animale**

### **9.1. Production avicole**

La production d'œufs riches en acides gras insaturés par des compléments alimentaires à base de graines a été la plus largement étudiée dans la production avicole. De nombreuses études ont confirmé que l'ajout de graines de lin à l'alimentation des poules pondeuses pouvait augmenter le dépôt d'AGPI n-3 dans les œufs. Une étude a montré que les AGPI n-3 du jaune d'œuf augmentaient de façon linéaire avec l'augmentation de la quantité de graines de lin. L'ajout de graines de lin au

régime alimentaire a également augmenté la quantité d'ALA bénéfique pour la santé dans les œufs et a amélioré la qualité des œufs en augmentant le niveau d'immunoglobuline Y (IgY) dans le jaune. En outre, l'alimentation avec 10 % de graines de lin pourrait modifier la composition en acides gras du jaune d'œuf et augmenter les niveaux d'acide docosahexaénoïque (DHA) dans les œufs. Les études précédentes montrent clairement que l'ajout de graines de lin à la ration peut être bénéfique pour la production d'œufs riches en AGPI n-3, non seulement parce que les coûts de traitement et la perte de nutriments sont réduits, mais aussi parce que la valeur nutritionnelle est augmentée pour la santé humaine (Xu *et al.*, 2022).

## **9.2. Alimentation des ruminants**

L'application de la Farine de lin chez les ruminants se concentre principalement sur les vaches laitières. Il est particulièrement important de fournir une alimentation appropriée aux vaches laitières pendant les phases de production de lait, car la teneur en nutriments du lait est sensible à l'alimentation. Il est reconnu que la graine de lin est riche en AGPI n-3 qui sont bénéfiques pour la santé humaine. Par conséquent, la production de lait riche en AGPI n-3 en complétant le régime alimentaire avec des graines de lin pour améliorer la santé humaine a attiré de plus en plus d'attention dans la production animale. De nombreuses études ont rapporté que la supplémentation en graines de lin de l'alimentation des vaches laitières est efficace pour augmenter les niveaux d'AGPI n-3 dans le lait. En outre, certaines études se sont également concentrées sur la phase de transition des vaches laitières de la fin de la gestation à la lactation. Au cours de cette période, les vaches laitières courent le plus grand risque de maladies métaboliques et infectieuses, voire de décès. La graine de lin est souvent utilisée comme source d'AG et pourrait atténuer le bilan énergétique négatif des vaches en début de lactation. Des études ont montré que l'alimentation des vaches laitières avec des graines de lin pendant la période de transition augmentait les concentrations de glycogène dans le foie après le vêlage et l'activité antioxydante, et diminuait les concentrations de triglycérides, ce qui pourrait contribuer à prévenir le développement d'un foie gras. Selon des études antérieures, l'ajout de graines de lin à l'alimentation des vaches laitières pourrait modifier le profil des acides gras du lait, réduire l'accumulation de lipides dans le foie et prévenir le développement de la stéatose hépatique, ce qui renvoie au rôle des graines de lin dans l'amélioration de la santé des vaches (Xu *et al.*, 2022).

Les graines de lin sont souvent utilisées pour favoriser le dépôt d'AGPI n-3 dans les tissus musculaires et améliorer la valeur nutritionnelle de la viande. L'ajout de graines de lin ou de farine de lin dans l'alimentation des bovins de boucherie est considéré comme globalement positif. Du point de vue de la sécurité des animaux, il est recommandé de ne pas utiliser plus de 5 % de graines

de lin pour l'alimentation concentrée des bovins, 7,5 % de farine de lin pour l'alimentation des veaux et 20 % de graines de lin pour l'alimentation des yearlings (**Xu et al., 2022**).

## **10. Utilisation Cosmétique**

Les produits cosmétiques à base des plantes ont toujours suscité beaucoup d'intérêt en raison de leur activité élevée et de leurs effets indésirables moindres que ceux des produits cosmétiques synthétiques. Le gel de graines de lin peut être utilisé comme hydratant sur le cuir chevelu et les cheveux pour favoriser la pousse des cheveux et renforcer les cheveux existants. Les huiles, les crèmes, les pommades, les pâtes et les gels sont des exemples de formulations topiques. Le gel capillaire à base de graines de lin allongera et définira les boucles, quel que soit le type de cheveux ou de boucles, et donnera un "aspect bouclé humide" lorsque les cheveux sont secs. Ce gel léger à base de graines de lin naturelles est conçu pour les cheveux bouclés, gras et ondulés. Il est enrichi en graines de lin et en huile de ricin qui constituent une source naturelle de vitamine E. Les graines de lin offrent un remède naturel pour la repousse des cheveux et aident à garder vos cheveux forts, brillants et sans frisottis ou flocons. Les graines de lin sont riches en lignine et en antioxydants, ce qui contribue à prévenir les rides et les ridules sur le visage. Les graines de lin contiennent également des acides gras qui contribuent à maintenir la peau hydratée et lisse (**Fale et al., 2022**).

## **11. Industrie de lin**

Les graines de lin ont été commercialement incorporées dans le pain, les muffins, les céréales, les crackers, les barres énergétiques, les mélanges pour pâtisseries, les snacks, les soupes et les gaufres. Le gâteau de graines de lin, qui est riche en protéines et en acides aminés essentiels, a un potentiel en tant qu'ingrédient protéique alternatif en vrac. La plupart des études ont indiqué que les graines de lin et les produits à base de graines de lin pouvaient être ajoutés aux aliments à un certain niveau sans avoir d'impact négatif sur la saveur des aliments (**Bekhit et al., 2018**).

## **12. Toxicité de lin**

Outre ses composés bioactifs, la graine de lin contient également des antinutriments tels que les glycosides cyanogéniques (CG), le cadmium, les inhibiteurs de trypsine et l'acide phytique qui peuvent réduire la biodisponibilité des nutriments essentiels et/ou limiter ses effets bénéfiques pour la santé. Les glycosides cyanogènes sont hautement toxiques et leur ingestion importante peut présenter un risque pour la santé et la vie humaine en compromettant les systèmes nerveux, endocrinien et respiratoire (**Nowak et Jeziorek, 2023**).

Les glycosides cyanogènes, peuvent libérer du cyanure d'hydrogène (HCN) dans l'intestin, ce qui constitue un risque potentiel pour la santé. La présence de glycosides cyanogènes dans les graines de lin limite le développement de produits à base de graines de lin (**Tang et al., 2021**).



Généralement, on procède à une torréfaction pour éliminer les glycosides cyanogènes. En outre, l'inhibiteur de trypsine et l'acide phytique sont d'autres antinutriments contenus dans la graine de lin, mais par rapport aux graines de soja et de colza, leur activité est faible (**Ganorkar et Jain, 2013**).



## **Chapitre II : Stress oxydant**

## 1. Les radicaux libres

Les radicaux libres sont des espèces chimiques (atomes, molécules ou ions) qui contiennent un ou plusieurs électrons non couplés dans leurs orbitaux externes et présentent généralement une réactivité remarquable. Les radicaux libres causaient exclusivement des effets nocifs. Cette idée a été principalement soutenue par la découverte que les radicaux libres d'oxygène (ROS) réagissent facilement avec toutes les macromolécules biologiques induisant leur modification oxydative et la perte de fonction (**Di Meo et Venditti, 2020**). les radicaux libres tentent de se lier avec d'autres molécules, atomes ou même électrons individuels pour créer un composé stable (**Martemucci et al., 2022**).

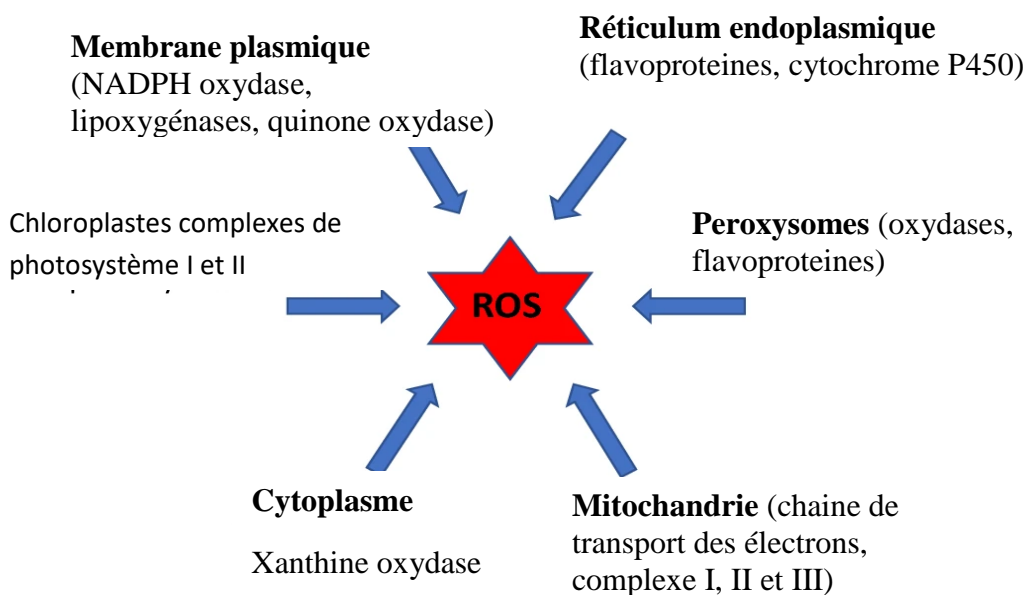
## 2. Les espèces réactives de l'oxygène

L'oxygène est une molécule essentielle à la survie des organismes aérobies ; cependant, en raison de sa structure atomique qui ne lui permet pas d'accepter les doublets électroniques, il peut générer des intermédiaires très instables connus sous le nom de ROS.

Les ROS sont des molécules de courte durée, très électrophiles, qui résultent de la réduction incomplète de l' $O_2$  moléculaire, et comprennent des peroxydes radicaux et non radicaux formés par la réduction partielle de l'oxygène (**Marciano et Vajro, 2017**).

### 2.1. Production endogène des ROS

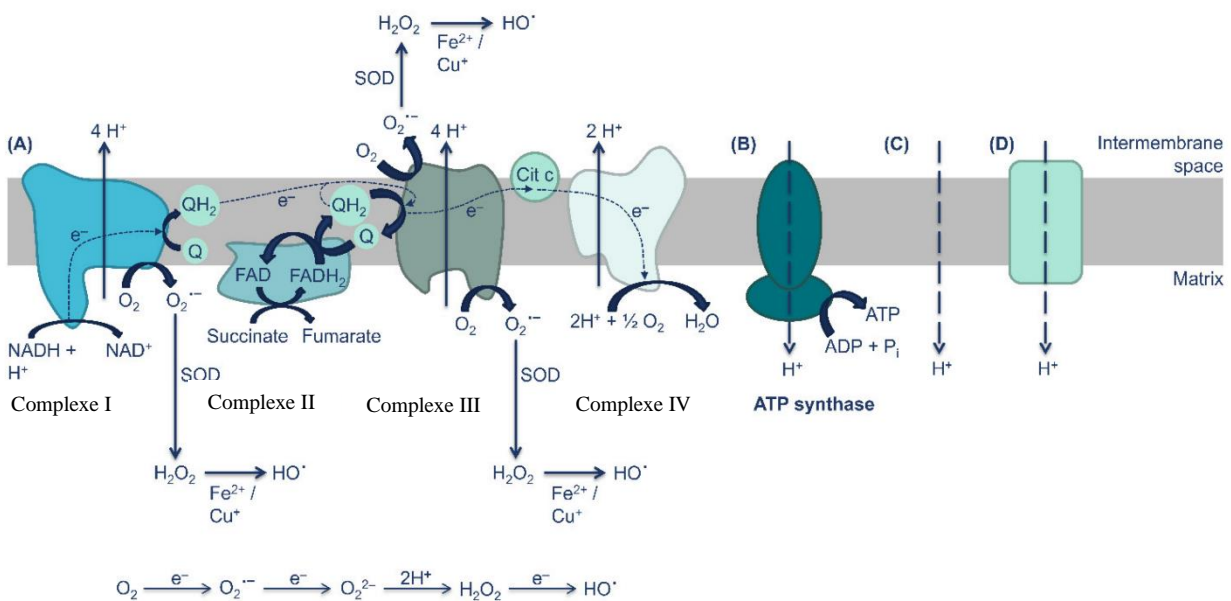
Il existe plusieurs enzymes et plusieurs compartiments à l'intérieur de la cellule où les ROS sont générés (**Hussain et Kayani, 2020**). comme indique dans la figure 4 :



**Figure 4:** Principales sources cellulaires de formation de ROS (**Jomova et al., 2023**).

### 2.1.1. Phosphorylation oxydative

La plus grande source de ROS est la phosphorylation oxydative mitochondriale, qui est essentielle pour produire les quantités élevées d'adénosine triphosphate (ATP) essentielles à la survie cellulaire. Toutefois, la phosphorylation oxydative n'est pas parfaitement couplée à la synthèse d'ATP et une partie de l'énergie présente dans la force électrochimique est dissipée en raison de la ré-entrée de protons dans la matrice mitochondriale indépendamment de la synthèse d'ATP. En effet, certains électrons s'échappent à l'oxygène (0,2-2 %), essentiellement dans les complexes I et III (Monteiro *et al.*, 2021) ; produisant du superoxyde (figure 5). Une partie du superoxyde est libérée dans le cytoplasme par le pore de transition de perméabilité mitochondriale situé dans la membrane mitochondriale externe. Cependant, la plupart des superoxydes sont dismutés en  $H_2O_2$  par les superoxydes dismutases (SOD) dans la matrice mitochondriale ou l'espace intermembranaire. L' $H_2O_2$  est hautement diffusible et spécifiquement transporté dans le cytoplasme par les aquaporines (aquaporines 3 et 8) en tant que second messager pour réguler de multiples voies de signalisation (Wang *et al.*, 2021).



**Figure 5:** Transport des protons et formation de ROS lors de la phosphorylation oxydative (Monteiro *et al.*, 2021).

### 2.1.2. Oxydation de NADPH

Les NADPH oxydases (NOX) sont une famille d'enzymes transmembranaires spécifiquement dédiées à la production de ROS cytosoliques (cytROS), principalement localisées dans la membrane plasmique (Canton *et al.*, 2021). Il s'agit d'une enzyme complexe composée de deux composants liés à la membrane et de trois composants dans le cytosol, plus rac 1 ou rac 2. L'activation de

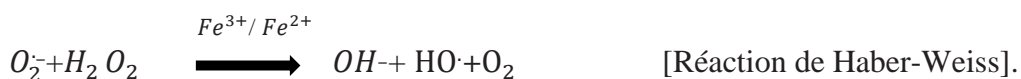
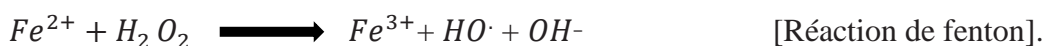
l'oxydase implique la phosphorylation de l'un des composants cytosoliques (**Babior, 2004**). Les NOX catalysent la formation de superoxyde ( $O_2^-$ ) en transférant un électron du nicotinamide adénine dinucléotide phosphate (NADPH) à l'oxygène selon la réaction suivante :



Le superoxyde peut ensuite être converti en  $H_2O_2$  par dismutation spontanée ou catalysée par la superoxyde dismutase. Jusqu'à présent, sept membres de la famille ont été décrits (NOX1-5 et Duox1-2), et trois d'entre eux (NOX1, NOX2 et NOX4) ont été identifiés dans les phagocytes (**Canton et al., 2021**).

### 2.1.3. Réaction de fenton et Haber-Weiss

Le fer joue un rôle important dans le maintien de la vie en participant au transport et au stockage de l'oxygène, au transport des électrons et au métabolisme énergétique, à la synthèse de l'acide désoxyribonucléique (ADN) et à de nombreux autres processus. D'autre part, le fer libre peut catalyser la formation de ROS tels que les radicaux hydroxyles (**Formanowicz et al., 2018**). La réaction de Fenton est définie comme la réaction entre le fer ferreux ( $Fe^{2+}$ ) et le peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ). Dans cette réaction, le fer ferrique ( $Fe^{3+}$ ) et le radical hydroxyle sont produits. Le radical hydroxyle réagit ensuite avec  $H_2O_2$  et produit du superoxyde ( $O_2^-$ ). Ensuite, le superoxyde réagit à nouveau avec  $H_2O_2$ , le radical hydroxyle et l'anion hydroxyle ( $OH^-$ ) sont formés ; cette partie de la réaction est connue sous le nom de "Haber-Weiss" (**Das et al., 2015 ; Shad et Das, 2023**). La réaction globale est représentée comme suit :

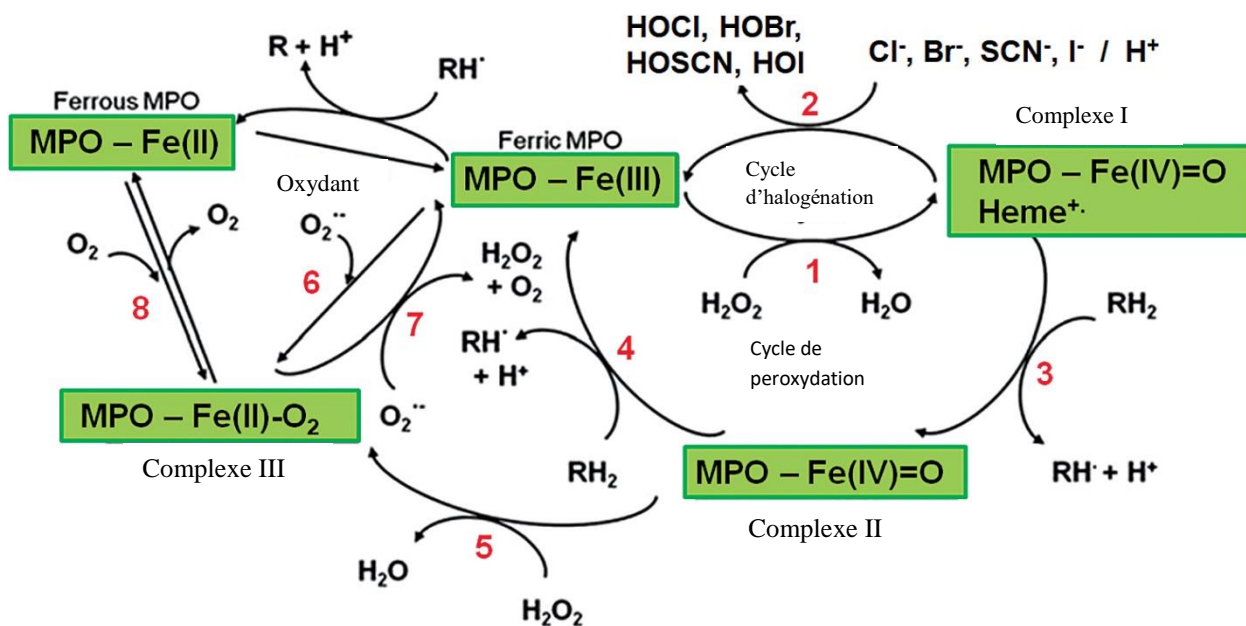


### 2.1.4. La myéloperoxydase

La myéloperoxydase (MPO) est une enzyme dérivée des leucocytes qui catalyse la formation d'un certain nombre d'espèces oxydantes réactives (**Nicholls et Hazen, 2005**). La myéloperoxydase est un élément clé du système immunitaire inné et est libérée principalement par les neutrophiles pour fournir une défense contre les agents pathogènes envahissants. Le MPO représente environ 5 % de la masse sèche des neutrophiles et est principalement contenu dans les granules azurophiles

lysosomiques. Lors de l'activation des neutrophiles, la fusion des lysosomes avec les phagosomes entraîne la libération de MPO, tandis que l'assemblage d'un complexe d'oxydase de NADPH sur la surface interne de la membrane entraînera la production d'anions de superoxyde ( $O_2^-$ ), qui se démutent rapidement pour former du peroxyde d'hydrogène (Davies et Hawkins, 2020).

L'  $H_2O_2$  réagit avec le MPO ferreux via une réaction à deux électrons pour produire le composé I [une espèce d'hème oxyféryl ( $Fe^{IV} = O$ ) avec un cation radical de porphyrine p], et une molécule d' $H_2O$ . Le composé I est ensuite converti à la forme ferrée par deux voies indépendantes et discrètes. Le premier concerne la réduction directe, à deux électrons, des espèces du composé I par des anions de halide ( $Cl^-$ , ions de bromure [ $Br^-$ ], ions d'iode [ $I^-$ ]) et de pseudohalide (ions de thiocyanate [ $SCN^-$ ]). Ceci est communément appelé « le cycle d'halogénéation » et entraîne la formation d'acides hypohaeux : HOCl, HOBr (acide hypobromeux), HOI (acide hypoiodeux) et acide hypothiocyanus. (HOSCN). La deuxième voie implique deux réactions séquentielles de réduction d'un électron, qui impliquent un second intermédiaire enzymatique, le composé II [une espèce d'hème oxy-ferryl ( $Fe^{IV} = O$ )]. Le composé II subit ensuite une seconde réduction d'un électron pour donner à l'espèce ferrée. Cette seconde voie est généralement appelée « le cycle de la peroxydase ». Ces processus et les constantes de taux de deuxième ordre correspondantes sont résumés à la figure 6. Un autre intermédiaire, le composé III, peut être formé par réaction de l'état ferreux avec l'anion radical de superoxyde ( $O_2^-$ ), ou par réduction d'un électron de la forme ferreuse ( $Fe^{2+}$ ) et l'addition ultérieure d' $O_2$ . Ces réactions permettent l'activité catalytique d' $O_2^-$  dépendant de MPO (Davies et Hawkins, 2020).



**Figure 6:** Génération et réactions d'intermédiaires redox de MPO (Davies et Hawkins, 2020).

### 2.1.5. Cytochrome P450

En plus, d'autres sources de ROS dans le cytosol impliquent la superfamille du cytochrome P450 (CYP), des enzymes hème-thiolate qui fonctionnent comme des monooxygénases (**Jomova et al., 2023**). Les P450s jouent deux rôles biologiques majeurs, le métabolisme xénobiotique et la biosynthèse de molécules bioactives. (**Albertolle et Guengerich 2018**).

Le cytochrome P450 utilise du dioxygène moléculaire dont un atome d'oxygène interagit avec le substrat et un second atome, avec l'utilisation de deux électrons fournis par NADPH, est réduit à une molécule d'eau. Si le transfert d'un oxygène à une molécule de substrat échappe aux mécanismes de contrôle, le découplage dans la formation de ROS et les dommages ultérieurs aux biomolécules peuvent se produire (**Jomova et al., 2023**).

### 2.1.6. La xanthine oxydase (XO)

Les XO sont des enzymes localisées dans le cytosol, impliquées dans le catabolisme des nucléotides puriques. La fonction des XO est d'oxyder les bases hypoxanthine et xanthine en acide urique, le produit final du catabolisme des purines, réactions au cours desquelles le  $H_2O_2$  est produit. Ainsi, le  $H_2O_2$  est le principal produit de cette enzyme. L'importance des XO est soulignée par leur contribution à l'activation de l'inflammasome dans les macrophages. L'activation de l'inflammasome induite par les XO par la libération de  $H_2O_2$  favorise l'activation de la voie de signalisation PI3K/AKT, qui induit l'activation de NLRP3 par la génération de ROS mitochondriaux (mtROS). Dans des organes tels que le cœur et le rein, les substrats hypoxanthine et xanthine sont également produits par la rupture de l'ATP pendant les épisodes ischémiques, induisant la production de  $H_2O_2$  et de  $O_2^-$  suite à la reperfusion. Des conséquences délétères ont été suggérées concernant la suractivation des XO dans les maladies cardiovasculaires, car le  $H_2O_2$  et le  $O_2^-$  sont générés, ce qui diminue la production d'oxyde nitrique. De plus, le  $H_2O_2$  et le  $O_2^-$  libérés par les XO peuvent provoquer l'oxydation des lipides ou des protéines, ce qui altère l'homéostasie en affectant les voies de signalisation ou en perturbant l'intégrité de la membrane cellulaire. Par conséquent, les XO sont nécessaires pour la réponse immunitaire, mais leur suractivation provoque des dommages (**Aranda-Rivera et al., 2022**).

### 2.1.7. Réticulum Endoplasmique (RE)

Une autre source critique de ROS est le RE, qui génère principalement du  $H_2O_2$  lors du pliage des protéines. La formation de  $H_2O_2$  est attribuée aux isomérase de ponts disulfures, qui génèrent un équivalent oxydant pour chaque pont disulfure formé. Ainsi, le  $H_2O_2$  est le sous-produit résultant du pliage des protéines (**Aranda-Rivera et al., 2022**).



### 3. Les espèces réactives de l'azote (RNS)

Dans l'organisme, les RNS sont également divisés en deux classes : radicalaires et non radicalaires. Les RNS radicalaires comprennent le NO, le dioxyde d'azote ( $NO_2$ ) et le trioxyde d'azote ( $NO_3$ ). Les RNS non-radicalaires comprennent l'acide nitreux ( $HNO_2$ ), l'anion nitroxy ( $NO^-$ ), le cation nitrosonium ( $NO^+$ ), le peroxydinitrite ( $NOOO^-$ ), le tétraoxyde de dinitrogène ( $N_2O_4$ ) et le trioxyde de dinitrogène ( $N_2O_3$ ) (Khan *et al.*, 2023).

#### 3.1. Production endogène des RNS

L'oxyde nitrique NO contient un seul électron non couplé qui le rend réactif avec d'autres molécules, comme l'oxygène, le glutathion et les radicaux superoxydes, produisant différents RNS, ce qui peut être très nocif. Bien que le NO ne soit pas une molécule très réactive, il est capable de former d'autres intermédiaires réactifs qui pourraient avoir un effet sur les cellules (figure 7). Par exemple, la réaction entre le NO et le superoxyde produit un oxydant très réactif, le peroxydinitrite (ONOO). Ses effets biologiques sont dus à sa réactivité vis-à-vis d'un large éventail de molécules, y compris les acides aminés comme la cystéine, la méthionine, la tyrosine et le tryptophane, les bases nucléaires, les glucosaminoglycans, les lipides et les antioxydants. Le peroxydinitrite subit deux réactions principales : l'oxydation et la nitration de la tyrosine pour former la 3-nitrotyrosine. L'anion de peroxydinitrite lui-même n'est pas très réactif vis-à-vis de la tyrosine mais protonné à l'acide conjugué ou à la formation de Lewis adduct avec le  $CO_2$  génère des agents de nitration de la tyrosine biologiquement pertinents (Cebrián *et al.*, 2005).

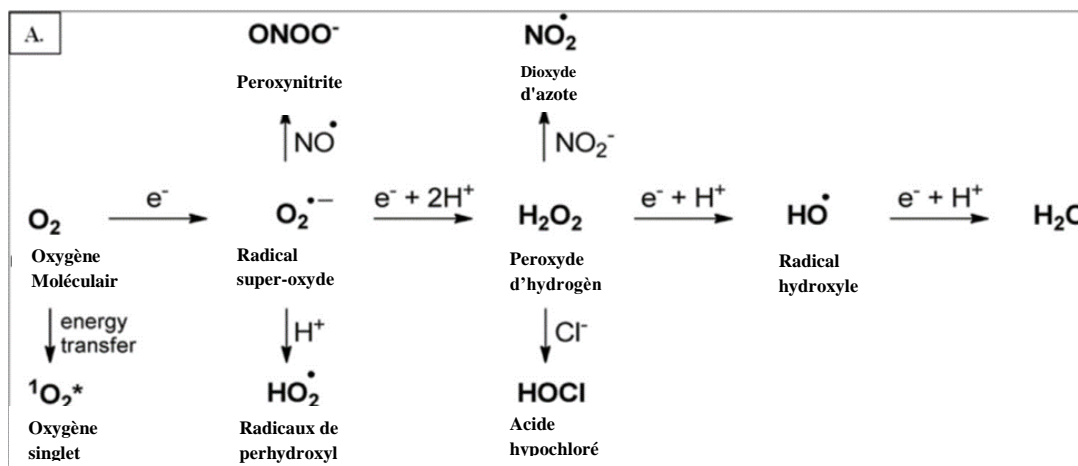


Figure 7: Formation de différents RNS (Mandal *et al.*, 2022).

### 4. Production exogène des ROS et RNS

Les déclencheurs environnementaux, tels que l'exposition à la fumée de cigarette, aux rayonnements ultraviolets (UV), aux ions de métaux lourds, à l'ozone, aux allergènes, aux

médicaments ou toxines, aux polluants, aux pesticides ou insecticides, peuvent tous contribuer à l'augmentation de la production de ROS dans les cellules.

## **5. Les rôles biologiques des radicaux libres**

Dans des conditions physiologiques, des petites quantités des radicaux libres se forment lors de processus cellulaires tels que la respiration aérobie ou les processus inflammatoires, principalement dans les hépatocytes et les macrophages (**Jakubczyk *et al.*, 2020**). Les radicaux libres peuvent jouer un rôle important dans l'évolution biologique, impliquant leurs effets bénéfiques sur les organismes (**Cebrián *et al.*, 2005**). Les radicaux libres sont principalement des molécules de signalisation. De plus, elles induisent la différenciation cellulaire et l'apoptose, contribuant ainsi au processus naturel de vieillissement. Elles participent également aux contractions musculaires, à la régulation du tonus vasculaire, et déterminent l'activité bactéricide et bactériostatique (**Jakubczyk *et al.*, 2020**).

## **6. Le système antioxydant**

Chez les humains, trois lignes de défense ont été développées. Elles fonctionnent à travers différents mécanismes: Inhiber, Capturer et Restaurer. La première ligne de défense qui élimine les ROS/RNS implique des antioxydants enzymatiques et non enzymatiques. Ils peuvent retarder ou empêcher l'initiation de différents stress oxydatifs directement et ceux-ci incluent le glutathion, l'acide urique, la vitamine E et la vitamine C. Les substances non enzymatiques dans le plasma sanguin telles que la transferrine, la ferritine, la céruloplasmine et l'albumine appartiennent aux antioxydants préventifs et ils inhibent la formation de nouvelles espèces réactives en se liant aux ions métalliques de transition (par exemple, le cuivre et le fer). Une autre ligne de défense consiste en des antioxydants non enzymatiques qui servent de défense intermédiaire pour inactiver les oxydants et les radicaux. La troisième et dernière ligne de défense implique la réparation et l'élimination des dommages, provoquant la régénération des biomolécules endommagées par une blessure oxydative. Les antioxydants terminent les réactions en chaîne oxydatives en se liant aux radicaux libres et en leur donnant leurs électrons, rendant ainsi les radicaux libres indisponibles pour de nouvelles attaques. Après avoir donné leurs électrons, les antioxydants atteignent l'état de radical libre. Par conséquent, ils ne sont pas nocifs, car ils ont la capacité d'accommoder le changement d'électrons, sans être eux-mêmes réactifs (**Hussain et Kayani, 2020**).

### **6.1. Enzymatique**

Plusieurs enzymes empêchent la formation de radicaux libres, Certaines d'entre elles agissent directement dans la neutralisation des ROS (enzymes primaires), tandis que les « enzymes

secondaires » jouent un rôle indirect en soutenant d'autres antioxydants endogènes (**Sharifi-Rad et al., 2020**).

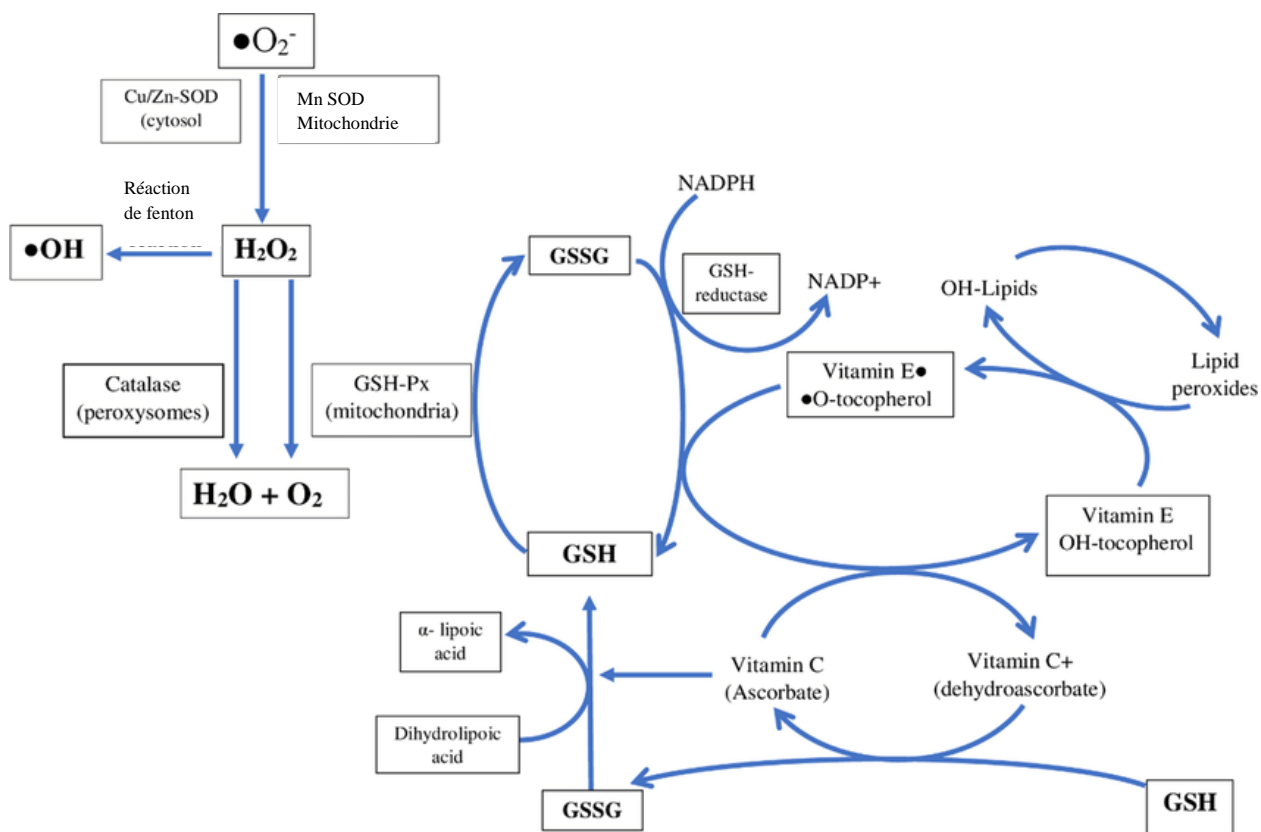
Les défenses enzymatiques ont toutes un métal de transition à leur cœur, capable de prendre différentes valences lorsqu'ils transfèrent des électrons pendant le processus de détoxification. Deux isoformes du superoxyde dismutase convertissent  $O_2$  en peroxyde d'hydrogène, la forme au manganèse qui est restreinte aux mitochondries, et la forme au cuivre et zinc qui est située dans le cytosol. Le peroxyde d'hydrogène est ensuite décomposé en eau par l'action de la catalase ou de la glutathion peroxydase, une sélénoprotéine tétramérique (**Burton et Jauniaux, 2011**).

L'activité de la glutathion peroxydase (GSH) dépend de la présence de glutathion réduit comme donneur d'hydrogène. Le glutathion est le principal tampon redox thiol cellulaire dans les cellules, et est synthétisé dans le cytosol à partir de L-glutamate, L-cystéine et glycine. Le GSH participe à un grand nombre de réactions de détoxification formant du disulfure de glutathion, qui est reconverti en GSH par l'action de la glutathion réductase aux dépens du NADPH. Ce dernier est généré par la voie des pentoses phosphates, dont la glucose-6-phosphate déshydrogénase est la première enzyme. Cette enzyme est sujette à des polymorphismes communs, et une activité diminuée peut compromettre les concentrations de GSH et conduire à une embryopathie (figure 8) (**Burton et Jauniaux, 2011**).

## **6.2. Non enzymatique**

Certaines molécules chimiques de faible poids moléculaire peuvent également agir directement comme des antioxydants. Dans ce cas, leur action n'est pas catalytique, nécessitant toujours une régénération antioxydante ou son approvisionnement dans l'alimentation. Les antioxydants non enzymatiques peuvent donc être divisés en endogènes (si la cellule eucaryotique est capable de le synthétiser) et exogéniques (si l'antioxydant doit être ingéré obligatoirement par l'alimentation) (**Sharifi-Rad et al., 2020**).

Les défenses non enzymatiques comprennent l'ascorbate (vitamine C) et l'alpha-tocophérol (vitamine E). Ces derniers agissent également de concert, l'ascorbate étant nécessaire pour régénérer l'alpha-tocophérol réduit. De plus, les composés thiols, tels que la thioredoxine, sont capables de détoxifier le peroxyde d'hydrogène, mais nécessitent à leur tour d'être reconvertis à la forme réduite par la thioredoxine réductase. La céruloplasmine et la transferrine jouent également des rôles importants en séquestrant les ions de fer libres et ainsi en inhibant la réaction de Fenton et la production d' $OH$  (figure 8) (**Burton et Jauniaux, 2011**).



**Figure 8:** Systèmes antioxydants enzymatiques et non-enzymatiques du corps contre les dommages des radicaux libres (Sindhu *et al.*, 2022).

## 7. Le stress oxydatif

Le stress oxydatif reflète le déséquilibre entre la production d'espèces réactives de l'oxygène et la capacité des systèmes biologiques à détoxifier les intermédiaires réactifs et/ou à réparer les dommages systémiques qui en résultent. Plusieurs preuves suggèrent que le stress oxydatif a un lien avec le développement de plusieurs maladies. Il représente le médiateur le plus important pour déclencher une inflammation de bas niveau dans le syndrome métabolique (y compris l'obésité, le diabète, l'hypertension, la stéatose hépatique non alcoolique), les maladies mentales/neurologiques (par exemple, l'autisme, la dépression, la maladie d'Alzheimer et la maladie de Parkinson) et le cancer (Marciano et Vajro, 2017).

## 8. Mécanismes du stress oxydatif

### 8.1. L'oxydation des lipides

Les membranes cellulaires sont sensibles aux dommages causés par les radicaux en raison de la présence d'acides gras polyinsaturés. Un autre effet majeur des ROS est la peroxydation des lipides, qui se produit lorsque les phospholipides membranaires entrent en contact avec un agent oxydant ROS. Dans cette réaction, le radical libre oxyde une chaîne lipidique insaturée, conduisant à la formation d'un lipide hydroperoxydé et d'un radical alkyle. Cette lipoperoxydation entraîne des

altérations de la structure de la membrane, affectant sa fluidité et endommageant son intégrité. Ce processus est initié par l'attaque d'un radical hydroxyle sur l'une des positions bis-allyliques mentionnées ci-dessus dans les chaînes latérales des acides gras, ce qui conduit à la génération d'un radical alkyle (Juan *et al.*, 2021).

## 8.2. L'oxydation des protéines

Les espèces réactives de l'oxygène peuvent attaquer les protéines et produire des carbonyles et d'autres dérivés d'acides aminés. La disponibilité de l'oxygène, de l'anion superoxyde et de sa forme protonée ( $HO_2^-$ ) détermine le processus d'oxydation des protéines. L'induction de la 3-chlorotyrosine à partir de la tyrosine par l'acide hypochloreux, l'oxydation de l'histidine en 2-oxohistidine au niveau du site de liaison métallique des protéines, l'oxydation des groupes thiols et la génération de dérivés carbonylés des acides aminés sont quelques exemples de modifications des protéines. Les espèces réactives de l'oxygène causent des dommages oxydatifs aux résidus d'acides aminés tels que la lysine, la proline, la thréonine et l'arginine, produisant des dérivés carbonylés. L'oxydation de différents acides aminés dénature les protéines et entraîne une perte de fonction, qu'il altère l'activité enzymatique, la fonction réceptrice ou la fonction de transport. Les groupes carbonyles sur les protéines ont été considérés comme des marqueurs de l'oxydation des protéines par les radicaux libres. Une augmentation de la concentration sérique des carbonyles protéiques est observée dans diverses pathologies telles que la maladie de Parkinson, les dystrophies musculaires, l'arthrite rhumatoïde, la progéria, l'athérosclérose et le vieillissement. Une récente base de données sur les protéines répertorie plus de 180 protéines qui sont carbonylées au cours du vieillissement et dans les troubles liés à l'âge (Martemucci *et al.*, 2022).

## 8.3. L'oxydation de l'ADN

Les ROS et les RNS peuvent endommager les acides nucléiques, induisant des modifications de base, des suppressions, des ruptures de cordes, des réarrangements chromosomiques, une hyper- et une hypo-méthylation et une modulation de l'expression génétique. L'ADN mitochondrial est plus vulnérable à l'attaque de ROS que l'ADN nucléaire parce qu'il est proche de l'endroit où les ROS sont générés. Une cellule produit environ 50 radicaux hydroxyles par seconde ; en un jour, toutes les cellules d'un humain produiraient quatre millions de radicaux hydroxylés, qui peuvent attaquer des biomolécules. Le radical  $HO\cdot$  réagit directement avec tous les composants de l'ADN, tels que les bases de purine et de pyrimidine et la colonne vertébrale du sucre de désoxyribose, provoquant des altérations (Martemucci *et al.*, 2022).



## **Chapitre III : Activité antioxydante des graines de lin**

## Activité antioxydante des graines de lin

De plus en plus de preuves émergent qui indiquent que les graines de lin sont une source abondante d'antioxydants naturels. Jusqu'à présent, les chercheurs ont exploré le potentiel antioxydant des graines de lin et de leurs composés phénoliques dans des études *in vitro* et *in vivo*. Dans la plupart de ces recherches, la capacité antioxydante des graines de lin entières ou de leurs extraits a été étroitement liée à leur concentration en composés phénoliques. Chera et al. (2022) ont étudié les effets antioxydants de l'extrait d'éthanol des graines de lin *in vitro*. L'activité antioxydante a été évaluée par le piégeage du radical 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl (DPPH), le pouvoir réducteur de fer (FRAP), le piégeage des radicaux du peroxyde d'hydrogène et le test de piégeage du (NO). Les résultats ont montré que les IC50 du test de FRAP et de DPPH pour le lin sont significativement plus élevés que ceux du Trolox. L'IC50 de l'activité de piégeage du lin est supérieure à celui du Trolox, mais avec une moindre signification. L'IC50 de l'activité de piégeage du NO du lin est significativement plus petite que celle du Trolox. Dans cette étude, les auteurs ont également examiné la corrélation entre les composés phénoliques totaux (TPC) et l'activité antioxydante. Cette relation est trouvée statistiquement significative. Dans une autre étude, Daddala et ses collègues (2022) ont évalué les activités antioxydante et antimicrobienne de l'extrait méthanolique à 80 % (V/V) de *Linum usitatissimum* L. L'activité antioxydante de l'extrait a été déterminée par son activité de piégeage des radicaux libres en utilisant le radical DPPH. Les résultats ont montré que l'activité antiradicalaire de *Linum usitatissimum* L. est directement proportionnelle à la dose de l'extrait méthanolique.

Le diglucoside de sécoisolariciresinol est le composé phénolique des graines de lin le plus étudié concernant son potentiel antioxydant *in vitro* jusqu'à présent. Aqeel et al (2021) ont étudié l'efficacité néphroprotectrice du SDG de lin contre la toxicité rénale induite par l'acétate de plomb (PbAc) chez les rats. Les résultats ont montré que le traitement avec le PbAc et le SDG a entraîné une augmentation significative ( $p < 0,05$ ) des concentrations d'enzymes antioxydantes et réduit le taux d'oxyde nitrique et la peroxydation lipidique dans le sérum sanguin. Ces résultats sont en accord avec ceux de Aqeel et al (2020), qui ont évalué l'effet du SDG sur la toxicité rénale induite par le chlorure de cadmium (CdCl<sub>2</sub>) chez les rats Wistar, ils ont trouvé que les niveaux de NO et de MPO chez les animaux traités par le CdCl<sub>2</sub> mélangé avec le SDG, sont significativement diminués ( $p < 0,05$ ) et que le traitement au SDG avant l'injection de CdCl<sub>2</sub> a entraîné des changements significatifs ( $p < 0,05$ ) dans l'activité des enzymes antioxydantes, comme en témoigne la restauration de leurs activités. Les résultats ont confirmé que le SDG agisse à la fois comme un puissant antioxydant et comme un agent chélateur potentiel. Ainsi, le SDG peut être plus efficace



s'il est ingéré sous sa forme pure plutôt que sous forme de graines de lin entières, car les graines de lin contiennent également tous les autres composés, qui peuvent interférer et affecter l'absorption, la digestion, la biodisponibilité et d'autres processus métaboliques du SDG.

Il y a en effet plusieurs études qui comparent l'activité antioxydante des différentes variétés des graines de lin. Koçak (2024) a étudié quinze variétés de l'espèce, dont certaines sont examinées pour la première fois. À cet égard, une série d'analyses de la composition chimique et d'essais antioxydants (DPPH, pouvoir réducteur des ions de fer et de cuivre et l'Activité de dépouillement des radicaux ABTS<sup>+</sup>) ont été effectués. L'analyse a révélé des différences significatives dans les teneurs totales en phénols entre les variétés. Tous les extraits testés ont montré une activité radicalaire plus élevée que les antioxydants standard, l'acide ascorbique et Trolox. Tous les extraits étaient plus efficaces que l' $\alpha$ -tocopherol, à l'exception du potentiel de réduction du cuivre. La valeur la plus élevée du TPC a été trouvée dans la variété Michael qui indique qu'elle a la capacité antioxydante la plus élevée. De plus, Yaqoob et ses collaborateurs (2021), ont travaillé sur huit cultivars différents de graines de lin sélectionnés et comparés selon leurs composés phénoliques et leur potentiel antioxydant par le test DPPH, la peroxydation de l'acide linoléique (LAP) et le pouvoir réducteur des ions ferriques. Les résultats ont indiqué que la variété Chandni a une activité de piégeage du radical DPPH supérieure aux autres variétés. D'autre part, la variété LS-101 a une capacité de peroxydation de l'acide linoléique et de pouvoir réducteur des ions ferriques plus élevée. Les chercheurs ont conclu que les graines de lin ont des activités antioxydantes prometteuses et varient d'une culture à l'autre, Cette variation pourrait être due aux différentes compositions génétiques variétales et aux régions agroclimatiques des cultivars. L'environnement a également un impact sur l'activité antioxydante des extraits.

Les différentes parties des graines de lin, telles que le mucilage (la gomme) et les écales, ont également été étudiées pour leur activité antioxydante et leurs applications dans différents produits alimentaires. Le mucilage de lin (FSG) est un hétéropolysaccharide composé d'éléments neutres et acides qui représente environ 8 % de la masse de la graine (Safdar *et al.*, 2019). Dans l'étude de Yang et al. (2020) sur les oligosaccharides du mucilage des graines de lin (FGOS) et leurs activités antioxydantes, ils ont constaté que l'activité de piégeage du radical hydroxyle, du DPPH et de l'ABTS des FGOS atteignent respectivement 78,3 %, 76,9 % et 75,6 % à des concentrations de 5.0 mg/mL, 5 mg/m et 25 mg/mL. Ces résultats sont proches de ceux de Safdar et al. (2019), qui ont évalué les effets antioxydants du mucilage des graines de lin par les tests DPPH et ABTS, et trouvé que l'activité de piégeage du radical DPPH et ABTS est significativement élevée de manière dose-dépendante.

Les écales des graines de lin sont une riche source de fibres alimentaires à base de lignine et de polysaccharides. Cependant, elles sont actuellement considérées comme un résidu industriel et la plupart du temps, elles sont traitées comme un déchet. Récemment, les polysaccharides des écales ont attiré une attention considérable des chercheurs dans les domaines alimentaire et pharmacologique en raison de leur gamme diversifiée d'attributs fonctionnels, de faible toxicité et d'une biodégradabilité élevée. Biao et al. (2020) ont étudié systématiquement les caractéristiques physicochimiques et les activités antioxydantes des polysaccharides extraits d'écales de la graine de lin. Ils ont conclu que ces extraits présentent un fort pouvoir antioxydant contre les radicaux DPPH, ABTS et hydroxyle. Dans une autre étude, Hao et Beta (2012) ont étudié le profil phytochimique des extraits des écales d'orge et de lin et évaluent leur capacité antioxydante à l'aide d'essais chimiques. Les résultats trouvés montrent que les écales de lin présentent la capacité de neutralisation du radical DPPH la plus élevée, quatre fois supérieure à celle des écales d'orge. Les deux études suggèrent que les écales de la graine de lin jouent un rôle essentiel en tant qu'antioxydants naturels.

L'huile de lin est bien reconnue pour ses avantages pour la santé, attribués à sa composition chimique unique présentant l'une des sources les plus riches d'acides gras oméga-3 polyinsaturés provenant de sources végétales. L'huile de lin est particulièrement riche en acides gras linoléiques et  $\alpha$ -linoléniques comme ses principaux constituants, pour cela, Plusieurs études ont été menées pour évaluer leur activité antioxydante. Gurumallu et cescollège en 2020, ont examiné les effets hépatoprotecteurs des acides gras bioactifs de graine de lin contre les lésions hépatiques induites par le tétrachlorure de carbone (CCl<sub>4</sub>) chez les rats. Les activités des enzymes antioxydantes *in vivo* telles que la catalase, la superoxyde dismutase et la peroxydase ont augmenté de manière significative pendant 28 jours consécutifs avant et après le traitement, alors que l'activité de la peroxydation des lipides a été considérablement diminuée d'une manière dose-dépendante dans le foie et les reins. Les résultats suggèrent que l'Oméga-3 de l'huile de lin a des effets antioxydants. D'autre part, Musazadeh et al. (2021), dans une méta-analyse déterminant l'impact de l'huile de lin sur le niveau des bio-marqueurs du stress oxydatif dans le sérum, ont montré que l'ajout d'huile de lin entraîne une diminution significative des concentrations de malondialdéhyde ( $P < 0.001$ ) et une augmentation des niveaux de capacité antioxydante totale ( $P < 0,001$ ). Aucun effet significatif n'a été observé sur le glutathion. Il semble que l'huile de lin pourrait être considérée comme un agent efficace dans l'augmentation du système de défense antioxydante, qui indique l'efficacité d'être mise dans le régime alimentaire régulier.

# **Conclusion**



## Conclusion

Le lin (*Linum usitatissimum* L.) est une plante qui a été utilisée il y a des milliers d'années et qui est encore cultivée aujourd'hui. Les composés phénoliques, les lignanes, les huiles, le mucilage et les écales des graines de lin ont suscité un intérêt croissant en raison de leur capacité antioxydante et de leurs avantages éventuels dans les applications alimentaires et pharmaceutiques, ainsi que pour leur effet bénéfique sur la santé humaine.

Les travaux menés *in vitro* et *in vivo* montrent que les extraits des graines de lin et ces différentes parties examinés pour leur potentiel antioxydant présentent une activité antioxydante égale ou légèrement supérieure à celle des antioxydants standards (trolox, BHT, l'acide ascorbique et l' $\alpha$ -tocophérol).

Cela suggère des approches alternatives pour l'utilisation industrielle dans le domaine agro-alimentaire et pharmaceutiques. Cependant, il est nécessaire d'enquêter sur leur sécurité en tant qu'antioxydant naturel en utilisant des bio-analyses *in vivo*.

## **Référence**

## Référence

- Albertolle, M. E., & Guengerich, F. P. (2018). The relationships between cytochromes P450 and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: Production, reaction, and inhibition. *Journal of inorganic biochemistry* **186**, 228-234.
- Aqeel, T., Gurumallu, S. C., Bhaskar, A., & Javaraiah, R. (2020). Secoisolariciresinol diglucoside protects against cadmium-induced oxidative stress-mediated renal toxicity in rats. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, **61**, 126552.
- Aqeel, T., Gurumallu, S. C., Bhaskar, A., Hashimi, S. M., Lohith, N. C., & Javaraiah, R. (2021). Protective role of flaxseed lignan secoisolariciresinol diglucoside against lead-acetate-induced oxidative-stress-mediated nephrotoxicity in rats. *Phytomedicine plus*, **1**(3), 100038.
- Aranda-Rivera, A. K., Cruz-Gregorio, A., Arancibia-Hernández, Y. L., Hernández-Cruz, E. Y., & Pedraza-Chaverri, J. (2022). RONS and oxidative stress: An overview of basic concepts. *Oxygen* **2**(4), 437-478.
- Babior, B. M. (2004). NADPH oxidase. *Current opinion in immunology* **16**(1), 42-47.
- Bekhit, A. E. D. A., Shavandi, A., Jodjaja, T., Birch, J., Teh, S., Ahmed, I. A. M., ... & Bekhit, A. A. (2018). Flaxseed: Composition, detoxification, utilization, and opportunities. *Biocatalysis and agricultural biotechnology* **13**, 129-152.
- Beroual, K., & Hamdi, P. Y. (2014). Impact de linum usitatissimum sur la régénération épithéliale et sur la pousse de poils.
- Biao, Y., Jiannan, H., Yaolan, C., Shujie, C., Dechun, H., McClements, D. J., & Chongjiang, C. (2020). Identification and characterization of antioxidant and immune-stimulatory polysaccharides in flaxseed hull. *Food chemistry*, **315**, 126266.
- Burton, G. J., & Jauniaux, E. (2011). Oxidative stress. *Best practice & research Clinical obstetrics & gynaecology* **25**(3), 287-299.
- Canton, M., Sánchez-Rodríguez, R., Spera, I., Venegas, F. C., Favia, M., Viola, A., & Castegna, A. (2021). Reactive oxygen species in macrophages: sources and targets. *Frontiers in immunology*, **12**, 734229.
- Cardoso Carraro, J. C., Dantas, M. I. D. S., Espeschit, A. C. R., Martino, H. S. D., & Ribeiro, S. M. R. (2012). Flaxseed and human health: reviewing benefits and adverse effects. *Food Reviews International* **28**(2), 203-230.
- Cebrián, J., Messeguer, A., Facino, R. M., & García Antón, J. M. (2005). New anti-RNS and-RCS products for cosmetic treatment. *International journal of cosmetic science* **27**(5), 271-278.
- Chera, E. I., Pop, R. M., Pârvu, M., Sorițău, O., Uifălean, A., Cătoi, F. A., ... & Pârvu, A. E. (2022). Flaxseed Ethanol Extracts' Antitumor, Antioxidant, and Anti-Inflammatory Potential. *Antioxidants*, **11**(5), 892.
- Daddala, G. B., Rani, A. S., & Kumar, A. K. (2022). EVALUATION OF ANTIOXIDANT, ANTIMICROBIAL ACTIVITY AND PHYTOCHEMICAL SCREENING OF AQUEOUS METHANOLIC EXTRACT OF *LINUM USITATISSIMUM*. *Journal of Advanced Scientific Research*, **13**(01), 147-152.

- Das, T. K., Wati, M. R., & Fatima-Shad, K. (2015).** Oxidative stress gated by Fenton and Haber Weiss reactions and its association with Alzheimer's disease. *Archives of Neuroscience* **2(2)**.
- Davies, M. J., & Hawkins, C. L. (2020).** The role of myeloperoxidase in biomolecule modification, chronic inflammation, and disease. *Antioxidants & redox signaling* **32(13)**, 957-981.
- Di Meo, S., & Venditti, P. (2020).** Evolution of the knowledge of free radicals and other oxidants. *Oxidative medicine and cellular longevity*, 2020.
- Diederichsen, A., & Richards, K. (2003).** Cultivated flax and the genus *Linum* L.: Taxonomy and germplasm conservation. In *flax. CRC Press* 34-66.
- Fale, S. K., Umekar, M. J., Das, R., & Alaspure, M. (2022).** A comprehensive study of herbal cosmetics prepared from flaxseed. *Multidiscip. Int. Res. J. Gujarat Technol. Univ* **4**, 106-112.
- Formanowicz, D., Radom, M., Rybarczyk, A., & Formanowicz, P. (2018).** The role of Fenton reaction in ROS-induced toxicity underlying atherosclerosis—modeled and analyzed using a Petri net-based approach. *Biosystems* **165**, 71-87.
- Ganorkar, P. M., & Jain, R. K. (2013).** Flaxseed—a nutritional punch. *International Food Research Journal*, **20(2)**.
- Gurumallu, S. C., Aqeel, T., Bhaskar, A., Chandramohan, K., & Javaraiah, R. (2022).** Synergistic hepatoprotective effects of  $\omega$ -3 and  $\omega$ -6 fatty acids from Indian flax and sesame seed oils against CCl<sub>4</sub>-induced oxidative stress-mediated liver damage in rats. *Drug and Chemical Toxicology*, **45(5)**, 2221-2232.
- Hao, M., & Beta, T. (2012).** Qualitative and quantitative analysis of the major phenolic compounds as antioxidants in barley and flaxseed hulls using HPLC/MS/MS. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **92(10)**, 2062-2068.
- Hosseinian, F. S., Muir, A. D., Westcott, N. D., & Krol, E. S. (2006).** Antioxidant capacity of flaxseed lignans in two model systems. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, **83(10)**, 835.
- Hussain, F., & Kayani, H. U. R. (2020).** Aging-Oxidative stress, antioxidants and computational modeling. *Heliyon* **6(5)**.
- Jakubczyk, K., Dec, K., Kalduńska, J., Kawczuga, D., Kochman, J., & Janda, K. (2020).** Reactive oxygen species—sources, functions, oxidative damage. *Polski Merkuriusz Lekarski: Organ Polskiego Towarzystwa Lekarskiego*, **48(284)**, 124-127.
- Jhala, A. J., & Hall, L. M. (2010).** Flax (*Linum usitatissimum* L.): current uses and future applications. *Aust. J. Basic Appl. Sci*, **4(9)**, 4304-4312.
- Jomova, K., Raptova, R., Alomar, S. Y., Alwasel, S. H., Nepovimova, E., Kuca, K., & Valko, M. (2023).** Reactive oxygen species, toxicity, oxidative stress, and antioxidants: Chronic diseases and aging. *Archives of toxicology* **97(10)**, 2499-2574.
- Juan, C. A., Pérez de la Lastra, J. M., Plou, F. J., & Pérez-Lebeña, E. (2021).** The chemistry of reactive oxygen species (ROS) revisited: outlining their role in biological macromolecules (DNA, lipids and proteins) and induced pathologies. *International journal of molecular sciences*, **22(9)**, 4642.



- Kasote, D. M. (2013).** Flaxseed phenolics as natural antioxidants. *International Food Research Journal*, **20**(1).
- Kausar, S., Hussain, A., Ashraf, S., Fatima, G., Javaria, S., Abideen, Z. U., ... & Korma, S. A. (2024).** Flaxseed (*Linum usitatissimum*); phytochemistry, pharmacological characteristics and functional food applications. *Food Chemistry Advances*, **4**, 100573.
- Khan, M., Ali, S., Al Azzawi, T. N. I., Saqib, S., Ullah, F., Ayaz, A., & Zaman, W. (2023).** The key roles of ROS and RNS as a signaling molecule in plant–microbe interactions. *Antioxidants*, **12**(2), 268.
- Koçak, M. Z. (2024).** Phenolic Compounds, Fatty Acid Composition, and Antioxidant Activities of Some Flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) Varieties: A Comprehensive Analysis. *Processes*, **12**(4), 689.
- Mandal, M., Sarkar, M., Khan, A., Biswas, M., Masi, A., Rakwal, R., ... & Sarkar, A. (2022).** Reactive Oxygen Species (ROS) and Reactive Nitrogen Species (RNS) in plants–maintenance of structural individuality and functional blend. *Advances in Redox Research*, **5**, 100039.
- Marciano, F., & Vajro, P. (2017).** Oxidative stress and gut microbiota. In *Gastrointestinal tissue. Academic Press*, **113-123**.
- Martemucci, G., Costagliola, C., Mariano, M., D'andrea, L., Napolitano, P., & D'Alessandro, A. G. (2022).** Free radical properties, source and targets, antioxidant consumption and health. *Oxygen*, **2**(2), 48-78.
- Monteiro, B. S., Freire-Brito, L., Carrageta, D. F., Oliveira, P. F., & Alves, M. G. (2021).** Mitochondrial uncoupling proteins (UCPs) as key modulators of ROS homeostasis: a crosstalk between diabetes and male infertility?. *Antioxidants* **10**(11), 1746.
- Musazadeh, V., Jafarzadeh, J., Keramati, M., Zarezadeh, M., Ahmadi, M., Farrokhian, Z., & Ostadrahimi, A. (2021).** Flaxseed oil supplementation augments antioxidant capacity and alleviates oxidative stress: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Evidence-based Complementary and Alternative Medicine*, **2021**
- Mzid, M., Ben Khedir, S., Ben Salem, M., Regaieg, W., & Rebai, T. (2017).** Antioxidant and antimicrobial activities of ethanol and aqueous extracts from *Urtica urens*. *Pharmaceutical biology*, **55**(1), 775-781.
- Nicholls, S. J., & Hazen, S. L. (2005).** Myeloperoxidase and cardiovascular disease. *Arteriosclerosis, thrombosis, and vascular biology* **25**(6), 1102-1111.
- Nowak, W., & Jeziorek, M. (2023).** The role of flaxseed in improving human health. In *Healthcare MDPI* **395**,11-3.
- Pierre, M., & Lys, M. (2007).** *Secrets des plantes*. Editions Artemis.
- Safdar, B., Pang, Z., Liu, X., Jatoi, M. A., Mehmood, A., Rashid, M. T., ... & Naveed, M. (2019).** Flaxseed gum: Extraction, bioactive composition, structural characterization, and its potential antioxidant activity. *Journal of food biochemistry*, **43**(11), e13014.
- Shad, K. F., & Das, T. K. (2023).** Introductory Chapter: Role of Fenton and Haber-Weiss Reaction in Epilepsy. In *Epilepsy-Seizures without Triggers*. IntechOpen.

- Shams, R., Pandey, V. K., Dar, A. H., Tripathi, A., & Singh, R. (2022).** A descriptive review on nutraceutical constituents, detoxification methods and potential health benefits of flaxseed. *Applied Food Research*, **2(2)**, 100239.
- Sharifi-Rad, M., Anil Kumar, N. V., Zucca, P., Varoni, E. M., Dini, L., Panzarini, E., ... & Sharifi-Rad, J. (2020).** Lifestyle, oxidative stress, and antioxidants: back and forth in the pathophysiology of chronic diseases. *Frontiers in physiology*, **11**, 694.
- Shekhara, N. R., Anurag, A. P., Prakruthi, M., & Mahesh, M. S. (2020).** Flax Seeds (*Linum usitatissimum*): Nutritional composition and health benefits. *IP J. Nutr. Metab. Health Sci*, **3**, 35-40.
- Sindhu, R. K., Kaur, P., Kaur, P., Singh, H., Batiha, G. E. S., & Verma, I. (2022).** Exploring multifunctional antioxidants as potential agents for management of neurological disorders. *Environmental Science and Pollution Research* **29(17)**, 24458-24477.
- Tang, Z. X., Ying, R. F., Lv, B. F., Yang, L. H., Xu, Z., Yan, L. Q., ... & Wei, Y. S. (2021).** Flaxseed oil: Extraction, Health benefits and products. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, **13(1)**, 1-19.
- Tanwar, B., & Goyal, A. (Eds.). (2021).** Oilseeds: health attributes and food applications. *Singapore: Springer*, 20220004233.
- Wang, Y., Qi, H., Liu, Y., Duan, C., Liu, X., Xia, T., ... & Liu, H. X. (2021).** The double-edged roles of ROS in cancer prevention and therapy. *Theranostics*, **11(10)**, 4839.
- Xu, L., Wei, Z., Guo, B., Bai, R., Liu, J., Li, Y., ... & Pi, Y. (2022).** Flaxseed meal and its application in animal husbandry: A review. *Agriculture*, **12(12)**, 2027.
- Yang, C., Hu, C., Zhang, H., Chen, W., Deng, Q., Tang, H., & Huang, F. (2020).** Optimization for preparation of oligosaccharides from flaxseed gum and evaluation of antioxidant and antitumor activities in vitro. *International journal of biological macromolecules*, **153**, 1107-1116.
- Yang, J., Wen, C., Duan, Y., Deng, Q., Peng, D., Zhang, H., & Ma, H. (2021).** The composition, extraction, analysis, bioactivities, bioavailability and applications in food system of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) oil: A review. *Trends in Food Science & Technology*, **118**, 252-260.
- Yaqoob, N., Munir, H., Aslam, F., Naseer, R., Kamal, S., Hussain, S., ... & Iqbal, M. (2021).** Antioxidant Potential and Phenolic Contents of Various Flaxseed Cultivars from Different Agro-Industrial Regions. *Pol. J. Environ. Stud*, **30(5)**, 4325.

## Résume :

Dans la vie, l'être humain est en exposition quotidienne à plusieurs facteurs extérieurs et intérieurs déclenchant le stress oxydatif, qui est responsable de diverses maladies. Pour cela, les chercheurs viennent d'étudier l'activité antioxydante de plusieurs plantes pour l'utiliser comme un antioxydant naturel. Les graines de lin ou *Linum usitatissimum L.*, est une espèce de plante de la famille des Linaceae, elle est considéré comme l'une des cultures oléagineuses les plus anciennes et les plus importantes, ayant été utilisées pour la nourriture et la fabrication des fibres textiles depuis plus de 5000 ans. Plusieurs études sur la composition chimique des graines de lin ont prouvé sa richesse en lignane et en composés phénoliques, principalement le diglucoside de secoisolariciresinol et Le secoisolariciresinol qui sont les molécules responsables de l'activité antioxydante. Cette étude met en évidence les composants de la graine de lin et principalement leur propriété antioxydante.

**Mots clés :** Graines de lin, Activité antioxydante, Composés phénoliques, Stress oxydatif, Maladies.

## Abstract:

In life, human beings are daily exposed to various external and internal factors that trigger oxidative stress, which is responsible for various diseases. Therefore, researchers have been seeking and studying the antioxidant activity of several plants to use them as natural antioxidants. Flaxseeds, or *Linum usitatissimum L.*, are a species of plant in the Linaceae family and are considered one of the oldest and most important oilseed crops, having been used for food and textile fiber for over 5000 years. Several studies on the chemical composition of flaxseeds have proven their richness in lignans and phenolic compounds, primarily secoisolariciresinol diglucoside and Secoisolariciresinol, which are molecules responsible for antioxidant activity. The aim of this study is to highlight the components of flaxseeds and primarily their antioxidant properties.

**Key words:** Flaxseeds, Antioxidant activity, Phenolic compounds, oxidative stress, Diseases.

## ملخص :

يتعرض الإنسان بصفة يومية لعدة عوامل خارجية وداخلية تثير التوتر التأكسدي، الذي يعتبر مسؤولاً عن العديد من الأمراض. لذا، بدأ العلماء في البحث ودراسة النشاط المضاد للأكسدة لعدة نباتات لاستخدامها كمضادات أكسدة طبيعية. تُعتبر بذور الكتان (*Linum usitatissimum L.*) صنفاً من النباتات في عائلة الكتانيات واحدة من أقدم وأهم المحاصيل، حيث تم استخدامها في الغذاء و صناعة الأنسجة لأكثر من 5000 عام. أثبتت العديد من الدراسات حول التركيب الكيميائي لبذور الكتان ثراءها بالليقتان والمركبات الفينولية، بشكل أساسي SDG وSECO، والتي تعتبر الجزيئات المسؤولة عن النشاط المضاد للأكسدة. تسلط هذه الدراسة الضوء على مكونات بذور الكتان وبشكل أساسي على خصائصها المضادة للاكسدة.

**الكلمات المفتاحية:** بذور الكتان، النشاط المضاد للأكسدة، المركبات الفينولية، التوتر التأكسدي، الأمراض.