



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique Et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche  
Scientifique



Université Constantine 1 Frères Mentouri  
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

جامعة قسنطينة 1 الإخوة منتوري  
كلية علوم الطبيعة والحياة

**قسم : Département de Biochimie et Biologie Cellulaire et Moléculaire**

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité : Biochimie

N° d'ordre :

N° de série :

Intitulé :

---

**Etude comparative entre différentes espèces de graines végétales (extrait brute et l'huile) : effet antioxydant, propriétés inhibitrices des enzymes et activité antifongique**

---

Présenté par : GOURARI Nour El Houda

Le : 25/06/2024

BELEGHRIB Ouarda

**Jury d'évaluation :**

**Président :** Dr. KHEDARA A (MCA- Université Constantine 1 Frères Mentouri).

**Encadrante :** Dr. KHATTABI L (MRB- Centre de Recherche en Biotechnologie-CRBt).

**Examinatrice :** Dr. MEDOUKALI I (MCB- Université Constantine 1 Frères Mentouri).

**Année universitaire  
2024 – 2025**



## *Remerciements*

*Nous adressons nos plus sincères remerciements à notre promotrice Dr.KHATTABI.LATIFA pour la rigueur scientifique dont elle a fait preuve, la pertinence de ses conseils, sa disponibilité constante et son engagement tout au long de ce travail. Nous lui exprimons notre profonde gratitude pour son accompagnement essentiel à la réalisation de ce mémoire.*

*Nous Remercions Monsieur KHEDARA. A, Docteur et maître de conférences à l'université de Constantine. Qui nous a fait un grand honneur d'avoir accepté de présider le jury de nos mémoires et d'évaluer notre travail.*

*Nous Remercions également Madame MEDOUKALI.I, Docteur à l'Université Mentouri Constantine qui nous a fait un grand honneur d'avoir accepté de participer à ce jury.*

*Et avec tous nos remerciements l'équipe de Centre de Recherche en Biotechnologie Constantine CRBt qui nous ont soutenus durant la période de recherche et beaucoup plus : Dr. BENSOUICI.CHAWKI; Dr.DEBBLALI ; M<sup>lle</sup>.HOUDA;Mr.BOUTAMINA.SMAINE.*





## *Dédicaces*

À mes parents,  
pour leur amour inconditionnel, leurs prières silencieuses et leur  
soutien indéfectible tout au long de mon parcours.

À mes sœurs,  
pour leur présence, leurs encouragements et leurs mots  
réconfortants dans les moments de doute.

À mon mari,  
pour sa patience, sa compréhension et son soutien constant qui  
m'ont portée dans chaque étape de ce travail

À ma copine Ouarda

*Gourari Nour el houda*





## *Dédicaces*

*Je dédie ce mémoire à :*

*Mes chers parents qui ont été toujours derrière moi avec Leur*

*Conseils, leur soutien et leurs encouragements.*

*Mes frères ; ma sœur ; mes adorables nièces et neveux.*

*Ma copine Nour et à toute ma famille*

*Belegtrib ouarda*



## Liste des abréviations

---

- ❖ **A0,5** : concentration donnant une absorbance égale à 0,5
- ❖ **AC** : activité antioxydante
- ❖ **AChE** : enzyme acétylcholinestérase
- ❖ **AE** : activité enzymatique
- ❖ **AG** : acide gallique
- ❖ **ALA** : acide  $\alpha$ -linolénique
- ❖ **Al<sup>3+</sup>** : ions d'aluminium
- ❖ **BChE** : enzyme butyrylcholinestérase
- ❖ **C. pepo** : *Cucurbita pepo*
- ❖ **CI 50** : concentration inhibitrice à 50 %
- ❖ **cm** : centimètre
- ❖ **CO<sub>2</sub>** : dioxyde de carbone
- ❖ **DAGs** : diacylglycérols
- ❖ **DMSO** : diméthylsulfoxyde
- ❖ **DTNB** : 5,5'-dithiobis-(2-nitrobenzoïque acide)
- ❖ **ECT** : extrait de citrouille
- ❖ **ECH** : extrait de chia
- ❖ **EF** : extrait de fenouil
- ❖ **EL** : extrait de lin
- ❖ **F. vulgar** : *Foeniculum vulgar*
- ❖ **FCR** : réactif Folin-Ciocalteu
- ❖ **Fe<sup>2+</sup>** : fer ferreux
- ❖ **Fe<sup>3+</sup>** : fer ferrique
- ❖ **FeCl<sub>3</sub>** : chlorure ferrique
- ❖ **FFAs** : acides gras libres
- ❖ **FRAP** : pouvoir réducteur ferrique
- ❖ **g** : gramme
- ❖ **H<sub>2</sub>O** : monoxyde de dihydrogène (eau)
- ❖ **HCH** : huile des graines de chia
- ❖ **HCT** : huile des graines de citrouille
- ❖ **HF** : huile de fenouil
- ❖ **HHDP** : hexahydroxydiphényl
- ❖ **h** : heure
- ❖ **HL** : huile de lin
- ❖ **IKI** : iodure de potassium iodé
- ❖ **I %** : pourcentage d'inhibition
- ❖ **K<sub>3</sub>Fe(CN)<sub>6</sub>** : ferricyanure de potassium
- ❖ **Kg** : kilogramme
- ❖ **KPa** : kilopascal
- ❖ **L. usitatissimum** : *Linum usitatissimum*
- ❖ **L** : litre
- ❖ **m<sup>2</sup>** : mètre carré
- ❖ **M** : molaire
- ❖ **MEP** : 2-C-méthyl-D-érythritol 4-phosphate / 1-déoxy-D-xylulose 5-phosphate
- ❖ **mg** : milligramme

## Liste des abréviations

---

- ❖ **min** : minute
- ❖ **mm** : millimètre
- ❖ **MS** : métabolites secondaires
- ❖ **µg** : microgramme
- ❖ **µl** : microlitre
- ❖ **nm** : nanomètre
- ❖ **PDA** : *Potato Dextrose Agar*
- ❖ **PC** : phosphatidylcholine
- ❖ **PA** : pas d'activité
- ❖ **PE** : phosphatidyléthanolamine
- ❖ **PI** : phosphatidylinositol
- ❖ **PLs** : phospholipides
- ❖ **Qrc** : quercétine
- ❖ **RAE** : équivalents d'activité rétinol
- ❖ ***S. hispanica*** : *Salvia hispanica*
- ❖ **SDG** : sécoisolaricirésinol diglucoside
- ❖ **SEF-CO<sub>2</sub>** : extraction au CO<sub>2</sub> supercritique
- ❖ **SEs** : esters de stérols
- ❖ **SPF** : facteur de protection solaire
- ❖ **TAGs** : triacylglycérols
- ❖ **TCA** : acide trichloracétique
- ❖ **TF** : flavonoïdes totaux
- ❖ **TP** : polyphénols totaux
- ❖ **TPTZ** : tripyridyltrizine
- ❖ **U** : unité enzymatique
- ❖ **USDA** : Département de l'Agriculture des États-Unis
- ❖ **UV** : rayons ultraviolets
- ❖ **UVB** : rayons ultraviolets de type B
- ❖ **Vol** : volume



## Liste des figures

Figure	Titre	Page
1	Répartition mondiale du potentiel de culture de <i>Salvia hispanica</i> selon le modèle Maxent.	4
2	Morphologie générale du <i>S. hispanica</i> .	4
3	Répartition mondiale de la production de plante citrouille	9
4	Morphologie générale de <i>cucurbita pepo</i> L.	10
5	Fleurs de lin	17
6	Capsule de lin	17
7	Graine de lin	17
8	Planche botanique du lin cultivé ( <i>Linum usitatissimum</i> L.)	17
9	Morphologie générale du fenouil ( <i>Foeniculum vulgare</i> L.) montrant différentes parties de la plante.	25
10	Schéma du principe de la technique d'hydrodistillation	30
11	Schéma de la technique d'extraction à froid.	31
12	Schéma de la technique d'extraction par le CO <sub>2</sub> supercritique.	32
13	Voies principales de synthèse des composés secondaires chez les plantes supérieures	35
14	Structure de base des polyphénols	36
15	Structure de base des flavonoïdes indiquant les cycles (A, C et B) et le nombre de substitutions	38
16	Structures des principaux lignanes alimentaires	44
17	Structure chimique de l'isoprène	45
18	Exemples d'alcaloïdes hétérocycliques	46
19	Graines utilisées pour l'étude	48
20	Machine d'extraction des huiles à partir des graines.	50
21	Les graines de ( <i>Linum usitatissimum</i> ), ( <i>Cucurbita pepo</i> ), ( <i>Salvia hispanica</i> ) et de ( <i>Foeniculum vulgare</i> ).	50
22	Broyage des graines	51
23	Macération des graines dans le méthanol	51
24	Filtration des extraits méthanoliques par un coton cardé.	52
25	Les filtrats des solutions des quatre graines.	52
26	Extrait méthanolique de <i>salvia hispanica</i> .	53
27	Schéma des étapes de préparation des extraits méthanoliques des graines	53
28	Réaction antioxydante par le radical DPPH	56
29	Réaction du pouvoir antioxydant réducteur ferrique	57

## Liste des figures

<b>30</b>	La souche fongique <i>fusarium sp.</i>	61
<b>31</b>	Schéma de la composition du milieu de culture PDA	62
<b>32</b>	Dépôt central du disque mycélien sur gélose PDA.	63
<b>33</b>	La plaque de dosages des polyphénols des plantes d'intérêts.	66
<b>34</b>	Courbe d'étalonnage de l'acide gallique.	66
<b>35</b>	Evaluation des polyphénols totaux des extraits et des huiles des CH, L, CT, F.	67
<b>36</b>	La plaque de dosages des flavonoïdes des extraits et des huiles des plantes d'intérêts	68
<b>37</b>	Courbe d'étalonnage de la Quercétine.	69
<b>38</b>	Evaluation des flavonoïdes totaux des extraits et des huiles des CH, L, CT et F.	69
<b>39</b>	Microplaque du test antioxydant contre le radical DPPH des extraits et des huiles	72
<b>40</b>	Représentation graphique de la CI 50 des huiles et des extraits de différentes graines.	72
<b>41</b>	Microplaques d'activité antioxydante du pouvoir réducteur FRAP.	74
<b>42</b>	Représentation graphique de l'A0,5 (test FRAP) des huiles et des extraits de différentes graines	74
<b>43</b>	Représentation graphique comparant le pourcentage d'inhibition d'acétylcholinestérase des huiles et les extraits des différentes graines	76
<b>44</b>	Microplaque de l'activité inhibitrice de l' $\alpha$ -amylase des extraits et des huiles.	77
<b>45</b>	Représentation graphique de la CI 50 des huiles et des extraits des différentes graines par rapport à l'inhibition d'alpha amylase.	78
<b>46</b>	Représentation graphique des valeurs de SPF des huiles et des extraits des différentes graines.	80
<b>47</b>	Distribution des Diamètre de croissance mycélienne traités par les huiles.	83
<b>48</b>	Distribution des Diamètre de croissance mycélienne traités par les quatre extraits (concentration de 30 mg/ml).	86



## Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
1	Caractéristiques morphologiques et structurelles de <i>S. hispanica</i> .	5
2	Classification taxonomique de <i>S. hispanica</i> (National Center for Biotechnology Information (NCBI) taxonomie)	6
3	Composition Nutritionnelle de <i>S. hispanica</i> . (Par 100 g)	7
4	Compositions HCH	8
5	Caractéristiques morphologiques et structurelles <i>C. pepo</i> .	11
6	Classification taxonomique de <i>Cucurbita pepo</i> L	12
7	Composition nutritionnelle de <i>C. pepo</i> (par 100 g)	13
8	Composition de HCT	15
9	Caractéristiques morphologiques et structurelles de <i>L. usitatissimum</i> .	18
10	Classification taxonomique de <i>L. usitatissimum</i> .	19
11	Composition nutritionnelle de <i>L. usitatissimum</i> (par 100 g)	20
12	Composition de HL	22
13	Caractéristiques morphologiques et structurelles de <i>F. vulgare</i> .	24
14	Classification du <i>F. vulgare</i> .	26
15	Composition nutritionnelle de <i>F. vulgare</i> (par 100 g)	27
16	Composition d'huile de <i>Foeniculum vulgare</i> .	29
17	Principales méthodes d'extraction des huiles essentielles et végétales à partir des plantes	33
18	Squelettes structuraux des composés phénoliques	37
19	Les principales classes des flavonoïdes	39
20	Principales classes des acides phénoliques	40
21	Classification des coumarines	41
22	Structures des tanins hydrolysables et condensés	43
23	Les activités biologiques des métabolites secondaires des quatre espèces	47
24	Teneur en polyphénols et en flavonoïdes totaux des extraits et des huiles des CH, L, CT, F	65
25	Les valeurs des CI 50 de radical DPPH des huiles et des extraits.	71
26	Les pourcentages d'inhibition d'Acétylcholinestérase des huiles et des extraits	76
27	Les valeurs des CI 50 d' $\alpha$ -amylase des huiles et des extraits	78
28	Les valeurs SPF des huiles et des extraits	80
29	Effet inhibiteur des huiles des graines seules ou en combinaison sur la croissance de <i>Fusarium sp.</i>	82
30	Effets des concentrations croissantes des extraits des plantes d'intérêt sur la croissance de <i>Fusarium sp.</i>	85

# **Table des matières**

Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction .....	16

## Partie I: Synthèse bibliographique

CHAPITRE 01 :GENERALITES SUR LES PLANTES D'INTERET .....	18
1. Plantes medicinales .....	3
2. Generalites sur <i>salvia hispanica</i> . ....	3
2.1. Définition.....	3
2.2. Origine et distribution géographique.....	3
2.3. Description de la plante .....	4
2.3.1. Description morphologique.....	4
2.3.2. Description botanique .....	5
2.4. Composition biochimique de <i>Salvia hispanica</i> . ....	6
2.5. Huile de <i>Salvia hispanica</i> . ....	8
2.6. Compositions d'huile de <i>Salvia hispanica</i> . ....	8
3. Generalite sur <i>cucurbita pepo</i> . ....	9
3.1. Définition.....	9
3.2. Origine et distribution géographique.....	9
3.3. Description de la plante .....	10
3.3.1. Description morphologies .....	10
3.3.2. Description botanique .....	12
3.4. Composition biochimique de la plante .....	12

3.5.	Huile de <i>Cucurbita pepo</i> .....	14
3.6.	Compositions d'huile de <i>Cucurbita pepo</i> .....	14
4.	Generalites sur <i>linum usitatissimum</i> . ....	16
4.1.	Définition.....	16
4.2.	Origine et distribution géographique.....	16
4.3.	Description de la plante .....	17
4.3.1.	Description morphologique.....	17
4.3.2.	Description botanique .....	19
4.4.	Composition biochimique de <i>Linum usitatissimum</i> . ....	20
4.5.	Huiles de <i>Linum usitatissimum</i> .....	20
4.6.	Composition d’huiles de <i>Linum usitatissimum</i> . ....	21
5.	Generalite sur <i>foeniculum vulgare mill</i> .....	23
5.1.	Définition.....	23
5.2.	Origine et distribution géographique.....	23
5.3.	Description de la plante .....	23
5.3.1.	Description morphologique.....	23
5.3.2.	Description botanique .....	25
5.4.	Compositions biochimiques de <i>Foeniculum vulgare</i> . ....	26
5.5.	Huiles essentielles de <i>Foeniculum vulgare</i> .....	28
5.6.	Composition d’huile de <i>Foeniculum vulgare</i> . ....	28
6.	Methodes d’extraction.....	30
6.1.	Hydrodistillation.....	30
6.2.	Pressage à froid .....	31
6.3.	Extraction par CO <sub>2</sub> (dioxyde de carbone) .....	32

CHAPITRE 02 :METHABOLITES SECONDAIRES .....	34
1. Generalite sur les metabolites secondaires.....	34
2. Definition .....	34
3. Classification des metabolites secondaires .....	35
3.1. Composés phénoliques .....	36
3.1.1. Classification des composés phénoliques .....	36
3.2. Terpénoïdes .....	44
3.3. Alcaloïdes .....	45
4. Activites biologiques des metabolites secondaires .....	46

## **Partie II: Matériel et méthodes**

1. Matiere biologique .....	48
1.1. Méthode d'extraction des huiles et des composés bioactifs .....	49
1.1.1. Extraction des huiles par pression à froid .....	49
1.1.2. Préparation des extraits méthanoïques des graines .....	50
2. Quantification de certains metabolites secondaires .....	54
2.1. Dosage des polyphénols totaux (TP).....	54
□ Principe.....	54
□ Mode opératoire .....	54
2.2. Dosage des flavonoïdes totaux (TF).....	55
□ Principe.....	55
□ Mode opératoire .....	55
3. Evaluation de l'activite biologique .....	55
3.1. Evaluation d'activité antioxydante <i>in vitro</i> .....	55
3.1.1. Test de piégeage du DPPH.....	55

3.1.2.	Test pouvoir réducteur de fer (FRAP) .....	57
3.2.	Évaluation des activités enzymatiques <i>in vitro</i> .....	58
3.2.1.	Test d'inhibition de l'acétylcholinestérase.....	58
3.2.2.	Test d'inhibition de l' $\alpha$ -amylase .....	59
3.3.	Test de photoprotection <i>in vitro</i> (SPF) .....	60
□	Principe.....	60
□	Mode opératoire .....	60
3.4.	Activité antifongique des plantes d'intérêts .....	61
3.4.1.	Matière fongique .....	61
3.4.2.	Choix du milieu de culture.....	62
3.4.3.	Préparation de milieu de culture (PDA).....	62
3.4.4.	Méthode des disques mycéliens.....	63
3.4.5.	Application des huiles et extraits .....	63

### Partie III: Résultats et discussion

1.	Quantification de certains métabolites secondaires.....	65
2.	Évaluation de l'activité biologique .....	71
2.1.	Évaluation d'activité antioxydante <i>in vitro</i> .....	71
□	Test de piégeage du DPPH.....	72
□	Test pouvoir réducteur de fer (FRAP).....	74
2.2.	Évaluation des activités enzymatiques <i>in vitro</i> .....	75
□	Test d'inhibition de l'acétylcholinestérase .....	75
□	Test d'inhibition de l' $\alpha$ -amylase .....	76
2.3.	Test de photoprotection <i>in vitro</i> (SPF) .....	81
3.4.	Activité antifongique des plantes d'intérêts .....	82
3.4.1.	Effet des huiles des plantes d'intérêt sur la croissance de <i>Fusarium sp.</i> ....	82
3.4.2.	Effet des extraits méthanoliques à différentes concentrations sur la croissance de <i>Fusarium sp.</i> .....	85
	Conclusion.....	89
	References bibliographiques .....	91
	Annexes	
	Résumés	

# **Introduction**



### Introduction

Depuis des siècles, les plantes médicinales jouent un rôle crucial dans la médecine traditionnelle de nombreuses civilisations. Aujourd'hui encore, elles demeurent une source importante de molécules bioactives utilisées dans les traitements médicaux, la prévention de maladies et le maintien de la santé humaine (Wink, 2003 ; Heinrich *et al.*, 2012). Dans un contexte d'intérêt croissant pour les thérapies alternatives, les graines végétales suscitent une attention particulière en raison de leur richesse en composés naturels bénéfiques.

Face aux risques croissants des thérapies synthétiques, notamment la toxicité, la résistance microbienne et les effets secondaires, les chercheurs sont orientés vers des alternatives naturelles, et ça pour la richesse des extraits des plantes en substance bioactive notamment les flavonoïdes, polyphénols, lignanes, acides gras insaturés et huiles essentielles, et avec un grand potentiel thérapeutique, telle que leurs effets antioxydants, photoprotectrice, antimicrobiens et enzymatiques (Dewick, 2009 ; Bhatti, 1997).

Dans cette étude, nous avons sélectionné quatre espèces végétales, particulièrement quatre graines : *Linum usitatissimum* (lin), *Cucurbita pepo* (citrouille), *Salvia hispanica* (chia) et *Foeniculum vulgare* (fenouil) dans le but de comparer leurs activités biologiques. Ces plantes sont reconnues pour leur richesse en métabolites secondaires et sont largement utilisées dans les domaines alimentaire, médicinal et cosmétique (Ayerza *et Coates*, 1999 ; Badgujar *et al.*, 2014 ; Stevenson *et al.*, 2007).

Le choix de ces espèces repose sur leur diversité biochimique et leur intérêt thérapeutique, telle que les graines de lin sont riches en oméga-3 et en lignanes à effet antioxydant et anticancéreux ; les graines de citrouille est utilisée pour ses propriétés anti-inflammatoires et antidiabétiques ; les graines de chia est une source exceptionnelle de fibres, polyphénols et acides gras insaturés ; les graines de fenouil, quant à lui, possède des huiles essentielles puissantes à effet antifongique et antioxydant (Ullah *et al.*, 2016 ; Ratnam *et al.*, 2017 ; Badgujar *et al.*, 2014).

Le présent travail est organisé en trois grandes parties :

- Une synthèse bibliographique représentant la première partie de notre travail est réalisée afin de regrouper les informations essentielles sur les plantes d'intérêt, avec les métabolites secondaires.

- La deuxième partie de notre étude, illustre le matériel biologique utilisé et les méthodes d'étude et d'expression des résultats.

- Dans la troisième partie, les résultats sont présentés et discutés en les comparant à ceux publiés dans la littérature scientifique internationale.

L'étude est achevée par une conclusion générale qui résume l'ensemble des résultats obtenus.

**Partie I :**

**Synthèse Bibliographique**

**Chapitre 01 :**

**Généralités sur les plantes  
d'intérêt**

### 1. Plantes médicinales

Les plantes sont utilisées à travers le monde comme remèdes pour soigner une grande variété de maladies. Les médicaments issus de sources végétales sont souvent considérés comme moins agressifs et moins toxiques que les traitements pharmaceutiques conventionnels. Les plantes médicinales représentent une ressource essentielle pour la grande rurale en Afrique, où majorité des populations plus de 80 % des habitants y ont recours pour assurer leurs soins de santé primaires (Mpondo *et al.*, 2017). Ces plantes sont connues par leur utilisation pharmacognosie (produits médicamenteux à base de plantes, remèdes traditionnels, phytomédicaments) ainsi que leurs applications cliniques désignés sous le terme herbal médecine au Royaume-Uni et phytothérapie (Heinrich *et al.*, 2012) et sont riches par des composés bioactifs naturels (flavonoïdes, les alcaloïdes, terpènes...) (Wink, M. 2008).

### 2. Généralités sur *salvia hispanica*.

#### 2.1. Définition

*Salvia hispanica* L (*S.hispanica*), communément appelée « chia », est une plante herbacée annuelle appartenant à la famille des Lamiacées (Muñoz *et al.*, 2013), les graines de chia se distinguent par une composition riche en acides gras (l'acide  $\alpha$ -linoléique  $\omega$ -3) (Ayerza et Coates 1999) des composés bioactifs a des diverses activités tel que l'activité antioxydante (Meléndez-Martínez *et al.*, 2007). Grâce à ses propriétés nutritionnelles et fonctionnelles, *Salvia hispanica* est reconnue par leur intérêt mondial, notamment dans le cadre de l'alimentation fonctionnelle et des régimes végétaliens (Ayerza *et al.*, 1999).

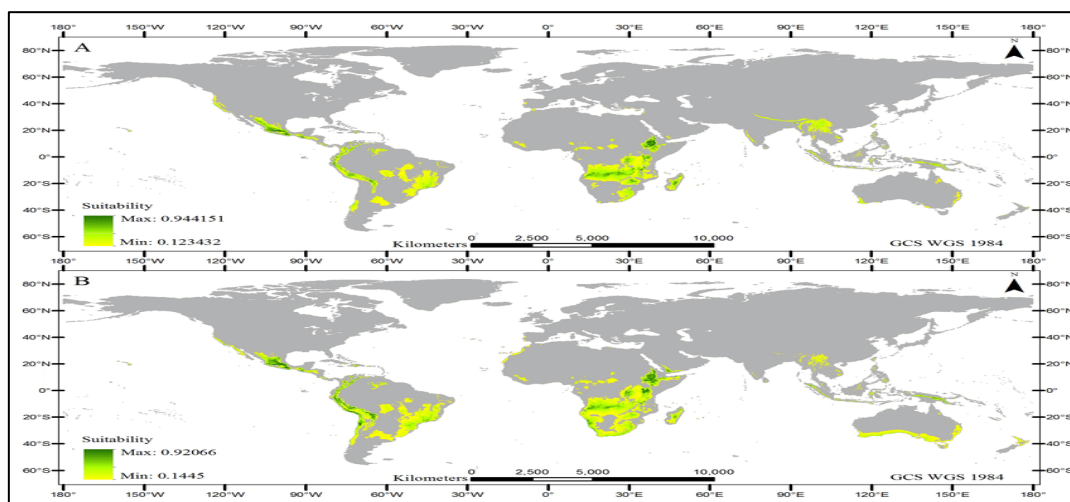
#### 2.2. Origine et distribution géographique

*S. hispanica* est une plante d'origine d'Amérique centrale, zone à climat tropical chaud, des régions montagneuses de l'ouest et du centre du Mexique, ainsi que du Guatemala. (Muñoz *et al.*, 2013 ; Sapio *et al.*, 2012).

À l'époque préhistorique, dans les sociétés colombiennes, il constituait la deuxième culture principale après les haricots (Ullah *et al.*, 2016). Tenochtitlan, capitale de l'Empire aztèque, recevait 5 à 15 000 tonnes de chia par an en tribut des nations conquises. La graine était également utilisée pour l'offrir aux dieux aztèques (Baudot., 1974) et en raison de son usage religieux, elle a pratiquement disparu pendant 500 ans (Ayerza *et al.*, 2004).

Un projet de développement de la chia comme culture commerciale a été lancé en 1991. En 1996, 13 champs ont été cultivés commercialement dans deux provinces du nord-ouest de l'Argentine. <https://doi.org/10.1007/s11746-998-01927>.

Cette distribution se représente ci-dessous dans la figure.



**Figure 1 :** Répartition mondiale du potentiel de culture de *Salvia hispanica* selon le modèle Maxent. A, culture pluviale ; B, culture irriguée (Cortés *et al.*, 2017) .

### 2.3. Description de la plante

#### 2.3.1. Description morphologique

*S. hispanica* est une plante de 1 à 1,5 m de hauteur, aux tiges ramifiées de section quadrangulaire et creuse, à pubescence courte et blanche feuilles opposées aux bords dentelés de 80 à 100 mm de longueur et de 40 à 60 mm de largeur, avec différents degrés de pubescence (XingúLópez *et al.*, 2017). La figure ci-dessous présente la morphologie générale de *S. hispanica*.



**Figure 2 :** Morphologie générale du *S. hispanica*.

A-B : exomorphologie. (A) : apparence générale d'un individu adulte. (B) : feuilles (Sapio *et al.*, 2012).

Les principales caractéristiques morphologiques de *S. hispanica* sont reportées ci-dessous :

**Tableau 1** : Caractéristiques morphologiques et structurelles de *S. hispanica*.

Partie de plante	Caractère
Hauteur	1 à 1,5m dans des conditions favorables (Hrnčič <i>et al.</i> , 2020)
Les tiges	Ramifiées de section quadrangulaire et creuse avec pubescence courte et blanche (Xingú López <i>et al.</i> , 2017).
Feuilles	Opposées à bords dentelés de 80 à 100 mm de longueur et de 40 à 60 mm de largeur, présentant différents degrés de pubescence. (Xingú López <i>et al.</i> , 2017).
Fleurs	Pétiolées inversées et dentelées, de 4 à 8 cm de long et de 3 à 5 cm de larg(Xingú López <i>et al.</i> , 2010). Avec une couleur Blanche et violette (Hrnčič <i>et al.</i> , 2020).
Graines	Généralement petites, environ 2 mm de long, 1 à 1,5 mm de large et plus de 1,0 mm d'épaisseur, plates et ovales (Das 2017).

### 2.3.2. Description botanique

*S. hispanica* est une plante de la famille des lamiacées avec une classification présenté dans le **tableau 2**.

**Tableau 2 :** Classification taxonomique de *S. hispanica* (National Center for Biotechnology Information (NCBI) taxonomie).

<b>REGNE</b>	<b>PLANTAE</b>
<b>SOUS-ROYAUME</b>	Viridiplantae
<b>INFRA-ROYAUME</b>	Streptophyta
<b>SUPER DIVISION</b>	Embryophyta
<b>DIVISION</b>	Tracheophyta
<b>SUBDIVISION</b>	Spermatophytina
<b>CLASSE</b>	Magnoliopsida
<b>FAMILLE</b>	Lamiaceae
<b>SUPERORDRE</b>	Asteranae
<b>ORDRE</b>	Lamiales
<b>GENRE</b>	<i>Salvia</i>
<b>ESPECE</b>	<i>Salvia hispanica</i> .

### 2.4. Composition biochimique de *Salvia hispanica*.

Bien que de nombreuses parties de la plante soient exploitées à des fins alimentaires, médicinales et pharmacologiques, l'intérêt scientifique se concentre principalement sur les graines. (TUNÇİL *et* ÇELİK, 2019)

La composition des graines de chia varie considérablement, avec des taux de protéines compris entre 15 et 25 %, de lipides entre 30 et 33 %, d'environ 41 % de glucides, de fibres alimentaires entre 18 et 30 %, de cendres entre 4 et 5 %, et une matière sèche allant de 90 à 93 %. Ces graines sont également riches en une grande variété de composés (Ullah *et al.*, 2016).

Les principales caractéristiques chimiques de la plante sont représentées dans le **tableau 3** :



**Tableau 3 :** Composition Nutritionnelle de *S. hispanica*. (Par 100 g).

Composant	Quantité Approximative	Référence / Source
Énergie	486 kcal	(USDA) (National Nutrient Database)
Protéines	16.5 g	(USDA ; Ixtaina <i>et al.</i> , 2011)
Lipides	30.7 g	USDA
Les acides gras oméga-3 (ALA)	17.8 g	(Ixtaina <i>et al.</i> , 2011 ; Ayerza <i>et al.</i> ; Coates., 2005)
Glucides	42.1 g	(USDA)
Fibres alimentaires	34.4 g	(USDA ; Ixtaina <i>et al.</i> , 2011)
Eau	5.8 g	(USDA)
Calcium	631 mg	(USDA)
Fer	7.7 mg	(USDA)
Magnésium	335 mg	(USDA)
Phosphore	860 mg	(USDA)
Potassium	407 mg	(USDA)
Zinc	4.6 mg	(USDA)
Antioxydants (polyphénols)	~70–100 mg/100 g	(Reyes-Caudillo <i>et al.</i> , 2008)

### 2.5. Huile de *Salvia hispanica*.

L'huile extraite des graines de *S. hispanica* (HCH), qui représentent 54.2% à 64.2% de la graine (Ayerza et Coates 2004) une huile végétale particulièrement riche en acide gras oméga-3 (Acide  $\alpha$ -linoléique), en oméga -6 et en anti-oxydants. Elle est également une source importante de lignanes, de phytostérols et de composés antioxydants. Grâce à cette composition, l'huile de graines de chia utilise aussi bien en médecine, en pharmacologie, en cosmétique (Valdivia-López et Tecante., 2015).

### 2.6. Compositions d'huile de *Salvia hispanica*.

La composition de HCH varie considérablement, avec des taux des acides gras différant et avec des Propriétés physiques (tel que la Couleur, la Densité (masse volumique) (Meléndez-Martínez et al., 2007) l'indice de réfraction et la Période d'induction (stabilité oxydative) et des propriétés chimiques (tel que la teneur en acides gras libres, l'indice d'acide, l'indice d'iode, l'indice de peroxyde et l'indice de saponification.

Les différentes compositions de HCH sont représentées ci-dessous :

**Tableau 4 : Compositions HCH (Ayyildiz et al., 2019).**

Catégorie	Paramètre	Valeur
<b>Profil en acides gras</b>	Acide $\alpha$ -linoléique ( $\omega$ -3)	~60 %
	Acide linoléique ( $\omega$ -6)	19,8 %
	Acide oléique ( $\omega$ -9)	8,20 %
	Acide palmitique	6,20 %
	Acide stéarique	3,00 %
<b>Composants fonctionnels</b>	Tocophérols totaux (vitamine E)	338,68 mg/kg
	Acide eicosanoïque	1,00 %
	$\beta$ -carotène	89,78 mg/kg
	Flavonoïdes (quercétine, myricétine)	Présents (valeurs non précisées)

### 3. Généralité sur *Cucurbita pepo*.

#### 3.1. Définition

*Cucurbita pepo* (*C. pepo*) est une plante de la famille cucurbitacées (El-Adl *et al.*, 2022), Cette famille forme un groupe très vaste et peut être cultivée dans les régions chaudes du monde entier, constituant ainsi une culture alimentaire populaire, Parmi ces espèces figurent notamment les courges, les citrouilles, les melons et les gourdes. *C. pepo* est l'une des plus anciennes espèces cultivées connues (Dar *et al.*, 2017). Cette plante est riche en composés phytochimiques, incluant des alcaloïdes, des flavonoïdes, ainsi que des acides gras tels que le palmitique, l'oléique et le linoléique. De nombreuses études pharmacologiques ont mis en évidence ses bienfaits, notamment sa capacité à protéger le foie, à freiner l'hyperplasie bénigne de la prostate, à réguler la glycémie, ainsi que ses propriétés antioxydantes, anticancéreuses, antimicrobiennes, anti-inflammatoires, antidiabétiques et antiulcéreuses. Ces résultats soutiennent son emploi traditionnel à des fins thérapeutiques (Ratnam *et al.*, 2017).

#### 3.2. Origine et distribution géographique

*C. pepo* est une plante annuelle appartenant à la famille des Cucurbitacées (El-Adl *et al.*, 2022) leur origine se situe en Amérique du Nord. Elles semblent avoir été utilisées dès la durée Préhistoire, bien avant leur domestication par les Amérindiens, qui les cultivèrent et les intégrèrent à leur alimentation et à leur pharmacopée. En XVI<sup>e</sup> siècle, Elles furent introduites en Europe (Myrtéa Formations, 2020). Cette distribution se représente ci-dessous dans la figure 3(FAO Stat, 2021).

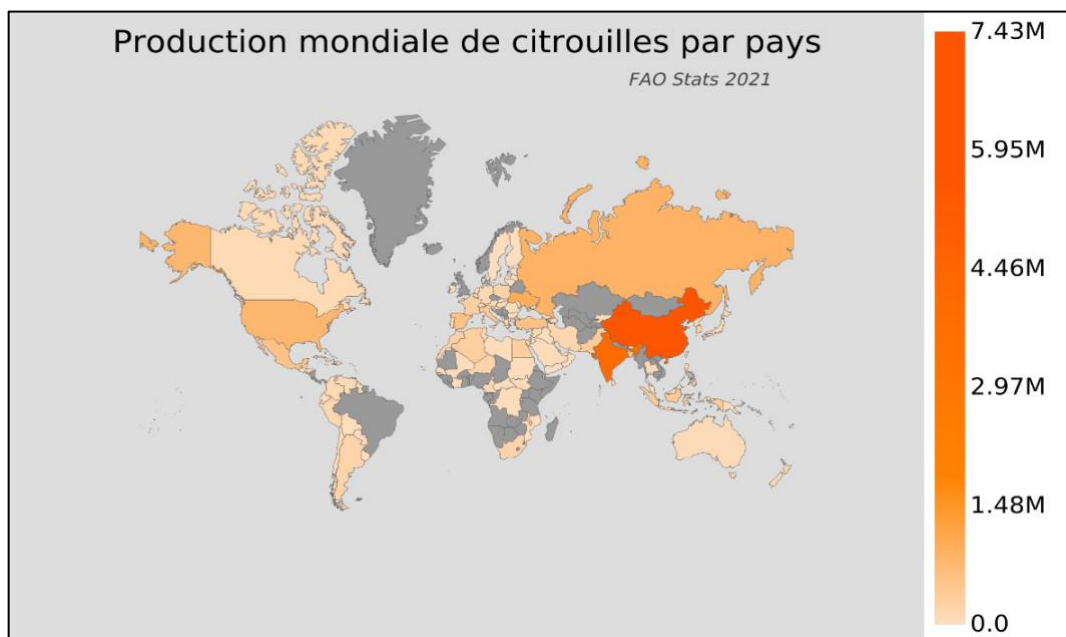


Figure 3 : Répartition mondiale de la production de plante citrouille.

### 3.3. Description de la plante

#### 3.3.1. Description morphologies

*C. pepo* est une plante annuelle atteignant souvent une taille imposante (plusieurs m<sup>2</sup>). Les fruits ont des formes, des couleurs (blanc, jaune, orange, rouge, vert, bleu-vert...) et des tailles très variées de 1 kg à 200 kg, (Nee, Michael, 1990). La plante possède un système racinaire superficiel mais bien ramifié (Babadoost *et* Zitter, 2009).

La figure ci-dessous présente la morphologie générale de *C. pepo*.



**Figure 4 :** morphologie générale de *cucurbita pepo* L.

A-morphologie de la plante (fruit, fleur, tige, feuille ) B : graine

[Big Yellow Squash Flower Fresh Recently Stock Photo 2389829499 | Shutterstock](#)

Les principales caractéristiques morphologiques *C. pepo* de sont reportées ci-dessous :

**Tableau 5 :** Caractéristiques morphologiques et structurelles *C. pepo*.

Partie de plante	Caractère
Les tiges	Rigide, souvent à 5 angles, et couverte de poils avec 10 faisceaux vasculaires bicollatéraux.
Feuilles	Mesurant de 12 à 15 cm de long sur 10 à 25 cm de large, cordées et profondément divisées en 5 lobes avec des sinus marqués, sans taches. (Agbagwa <i>et</i> Ndukwu 2004)
Fleurs	De couleur jaune clair, de forme massive et tubulaire. Elle possède un calice à cinq côtes marquées, très étroit et aciculaire, mesurant entre 1,2 et 1,5 cm de long. Elle contient trois étamines soudées entre elles, avec des anthères de couleur jaune (Agbagwa <i>et al.</i> , 2004).
Fruit	<p><b>Forme :</b> La plupart des citrouilles sont rondes, mais certaines sont oblongues ou en forme de poire.</p> <p>Diamètre : varie de 5 cm à plus de 50 cm.</p> <p><b>Pois :</b> Les citrouilles peuvent peser de moins de 0,5 kg à plus de 500 kg, avec une classification basée sur leur taille, comme suit : géantes (&gt;22,5 kg), très grandes standards (13,5 à 22,5 kg), grandes standards (7 à 13,5 kg), moyennes standards (3 à 7 kg), petites standards (0,5 à 3 kg), et miniatures (&lt;0,5 kg).</p> <p><b>Couleur :</b> blanc, jaune, orange, rouge, vert, bleu-vert... (Babadoost <i>et</i> Zitter, 2009).</p>
Graines	Graine d'environ 1,8 cm de longueur et 0,9 cm de largeur, présentant une surface lisse et une teinte blanche et une marge parfaitement lisse (Agbagwa <i>et al.</i> , 2004)

### 3.3.2. Description botanique

*C. pepo* est une plante de la famille des Cucurbitacées avec une classification suivante.

**Tableau 6 :** Classification taxonomique de *Cucurbita pepo* L (Feller *et al.* 1995).

RANG TAXONOMIQUE	NOM
REGNE	Plantae (Plantes)
SOUS-REGNE	Tracheobionta (Plantes vasculaires)
DIVISION	Magnoliophyta (Angiospermes)
CLASSE	Magnoliopsida (Dicotylédones)
SOUS-CLASSE	Dilleniidae
ORDRE	Cucurbitales
FAMILLE	Cucurbitaceae (Cucurbitacées)
GENRE	<i>Cucurbita</i>
ESPECE	<i>Cucurbita pepo</i> L.

### 3.4. Composition biochimique de la plante

Les médecines traditionnelles, notamment l'Ayurvêda et la médecine chinoise, ont fait un large usage des différentes parties de *C. pepo*, en raison de leurs propriétés médicinales. Cette reconnaissance thérapeutique s'explique par la richesse de la plante en substances bioactives (Ratnam *et al.*, 2017). Bien que toutes les parties de la citrouille soient utiles, les graines sont particulièrement importantes car elles renferment une grande quantité de nutriments essentiels et de composés actifs (Tripathi *et al.*, 2023).

Les principaux caractères biochimiques de la plante sont représentées ci-dessous :

**Tableau 7 :** Composition Nutritionnelle de *C. pepo* (par 100 g).

Composant	Quantité approximative	Référence / Source
Énergie	559 kcal	(USDA) National Nutrient Database
Protéines	30.23g	(USDA ; Fruhbeck <i>et al.</i> , 2001 ; Hussain Dar & Rafiq, 2017)
Lipides	49.05g	(USDA ; Hussain Dar <i>et</i> Rafiq, 2017)
Les acides gras insaturés	~35 g	(Stevenson <i>et al.</i> , 2007)
Glucides	10.71g	USDA/(Hussain Dar <i>et</i> Rafiq, 2017)
Fibres alimentaires	6.0 g	(USDA)
Eau	5.0 g	(USDA)
Calcium	46 mg	USDA/(Hussain Dar <i>et</i> Rafiq, 2017)
Fer	8.8 mg	(USDA)
Magnésium	592 mg	USDA/(Hussain Dar <i>et</i> Rafiq, 2017)
Phosphore	1233 mg	USDA/(Hussain Dar <i>et</i> Rafiq, 2017)
Potassium	809 mg	USDA/(Hussain Dar <i>et</i> Rafiq, 2017)
Zinc	7.81 mg	USDA / Frühbeck <i>et al.</i> , 2001, Hussain Dar <i>et</i> Rafiq 2017)
Phytostérols	~265 mg	(Ryan <i>et al.</i> , 2007)
Antioxydants (vitamine E, etc.)	~4 mg	(Tocophérols Stevenson <i>et al.</i> , 2007)



### 3.5. Huile de *Cucurbita pepo*

L'huile extraite des graines de *C. pepo* (HCT), qui représentent 40 à 60 % de la graine, est une huile végétale particulièrement riche en nutriments et en composés bioactifs. Elle contient une grande variété d'acides gras saturés et insaturés, notamment les oméga-3, oméga-6 et oméga-9. Elle est également une source importante de lignanes, de phytostérols et de composés antioxydants, tels que la vitamine E et les tocophérols.

Grâce à cette composition, HCT peut être utilisée aussi bien en médecine conventionnelle qu'alternative, en pharmacologie ainsi qu'en cosmétique, en particulier lorsqu'elle est issue de l'agriculture biologique (Bavec, F *et al.*, 2017).

### 3.6. Compositions d'huile de *Cucurbita pepo*

La composition d'huile des graines de citrouille varie considérablement avec des taux de l'acide oléique, linoléique (jusqu'à 60.8%), palmitique (jusqu'à 14.5%), acide stéarique (jusqu'à 7.4%), avec un rapport de l'acide monoinsaturée à l'acide polyinsaturée de 0.60 à 0.75 (Stevenson *et al.*, 2007).

Les principales caractéristiques chimiques de la plante sont représentées ci-dessous :

**Tableau 8 : Composition de HCT (Ayyildiz *et al.*, 2019)**

Catégorie	Composants spécifiques	Quantité	Références
<b>Triacylglycérols (TAGs)</b>	TAGs	92.7–93.4% des lipides totaux	(Yoshida <i>et al.</i> , 2004)
<b>Phospholipides (PLs)</b>	PC (~55%), PI (~25%), PE (~20%)	1.5% des lipides totaux	(Yoshida <i>et al.</i> , 2004 ; El-Adawy <i>et Taha</i> , 2001)
<b>Acides gras insaturés</b>	Linoléique (C18 :2), Oléique (C18 :1), $\alpha$ -linolénique (C18 :3, traces)	Linoléique : 35.6–60.8%, Oléique : 21–46.9%	(Lerma-García <i>et al.</i> , 2015 ; Stevenson <i>et al.</i> , 2007)
<b>Acides gras saturés</b>	Palmitique (C16 :0), Stéarique (C18 :0)	Palmitique : 9.5–14.5%, Stéarique : 3.1–7.4%	(Fruhworth <i>et Hermetter</i> , 2007)
<b>Acides gras libres (FFAs)</b>	FFAs	2.9–3.5%	(Yoshida <i>et al.</i> , 2004)
<b>Diacylglycérols (DAGs)</b>	sn-1,3 DAGs : 0.4–0.9%, sn-1,2 DAGs : 0.7–0.9%	Variable	(Yoshida <i>et al.</i> , 2004)
<b>Esters de stérols (SEs)</b>	Esters de stérols	0.5–1.2%	(Jakab <i>et al.</i> , 2003)
<b>Tocophérols / Tocotriénols</b>	$\alpha$ -, $\gamma$ -, $\delta$ -tocophérols ; tocotriénols	$\alpha$ : 27–75 mg/g, $\gamma$ : 75–493 mg/g, $\delta$ : 35–1110 mg/g	(Matus <i>et al.</i> , 1993 ; Stevenson <i>et al.</i> , 2007)
<b>Phytostérols</b>	$\Delta$ 7-stérols (majoritaires), $\Delta$ 5 et $\Delta$ 8 ; $\beta$ -sitostérol, campestérol, stigmastérol	~0.5% ; 55–60% de la fraction insaponifiable	(Bastić <i>et al.</i> , 1977 ; Dulf <i>et al.</i> , 2009)
<b>Caroténoïdes</b>	$\beta$ -carotène, lutéine, zéaxanthine, cryptoxanthine	Total : ~71 mg/kg ; $\beta$ -carotène : ~28.5 mg/kg	(Parry <i>et al.</i> , 2006 ; Inocent <i>et al.</i> , 2007)
<b>Composés phénoliques</b>	Acides caféique, férulique, vanillique, o-coumarique ; tyrosol, trans-cinnamique	Traces	(Haiyan <i>et al.</i> , 2007 ; Tuberoso <i>et al.</i> , 2007)
<b>Lignans / Phytostrogènes</b>	Sécoisolariciresinol, daidzéine, génistéine	Modéré	(Sicilia <i>et al.</i> , 2003 ; Mazur, 1998)
<b>Squalène</b>	Squalène	71.6 mg / 100 g huile	(Kalogeropoulos <i>et al.</i> , 2013)

### 4. Généralités sur *Linum usitatissimum*.

#### 4.1. Définition

Le lin du nom Latin *Linum usitatissimum* (*L. usitatissimum*) signifie « le plus utile » (en anglais Flax, en arabe El-katan), est une plante herbacée annuelle qui appartient à la famille des Linacées (**Beard et al., 1980**). Cette famille présente plus de 200 espèces de lin (**Bolsheva et al., 2015**). Le lin est utilisé dans les domaines de l'industrie textile (fibres), alimentaire (graine et huile) et chimique (huile) (**Beroual et al., 2013**).

#### 4.2. Origine et distribution géographique

Le lin cultivé (*L. usitatissimum*) est une plante originaire du Croissant fertile, une région qui englobe l'Irak, la Syrie, la Turquie, l'Iran et l'Égypte. Sa domestication remonte à environ 8000 ans, au Néolithique, où il était cultivé pour ses fibres textiles et son huile. À partir de cette région, le *L. usitatissimum* est progressivement répandu vers l'Europe, notamment en France, en Belgique, aux Pays-Bas et en Russie, ainsi qu'en Asie (Inde et Chine).

Aujourd'hui, sa culture est largement répandue dans les zones tempérées du globe, où il est exploité à grande échelle pour des usages industriels, alimentaires et pharmaceutiques. (**ACIA., 2019**).

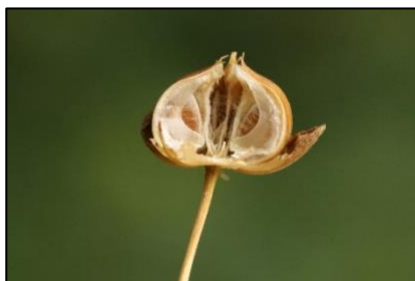
Le Fédération de Russie est le principal producteur de lin, suivi de la Kazakhstan, Canada et la Chine (**FAOSTAT., 2023**).

### 4.3. Description de la plante

#### 4.3.1. Description morphologique

La plante de *L. usitatissimum* présente une hauteur généralement comprise entre 30 et 100 cm, cette dernière variable en fonction des variétés et des conditions de culture, Les feuilles mesurent entre 3 et 13 mm de large et 15 à 55 mm de longue, ce sont simples, alternes, de forme lancéolée, dotées de trois nervures longitudinales (Vaisey *et al.*, 2003). Les fleurs, de couleur variant du blanc au violet, sont regroupées en cymes bipares terminales. La fructification se présente sous forme de capsules sphériques à déhiscence septale, contenant cinq loges, chacune renfermant 6 à 10 graines au maximum (Oplinger *et al.*, 2008).

Les figures ci-dessous présentent la morphologie générale de *L. usitatissimum*.



Figur 5 : fleurs de lin

Figure 6 : capsule de lin

Figure 7 : graine de lin

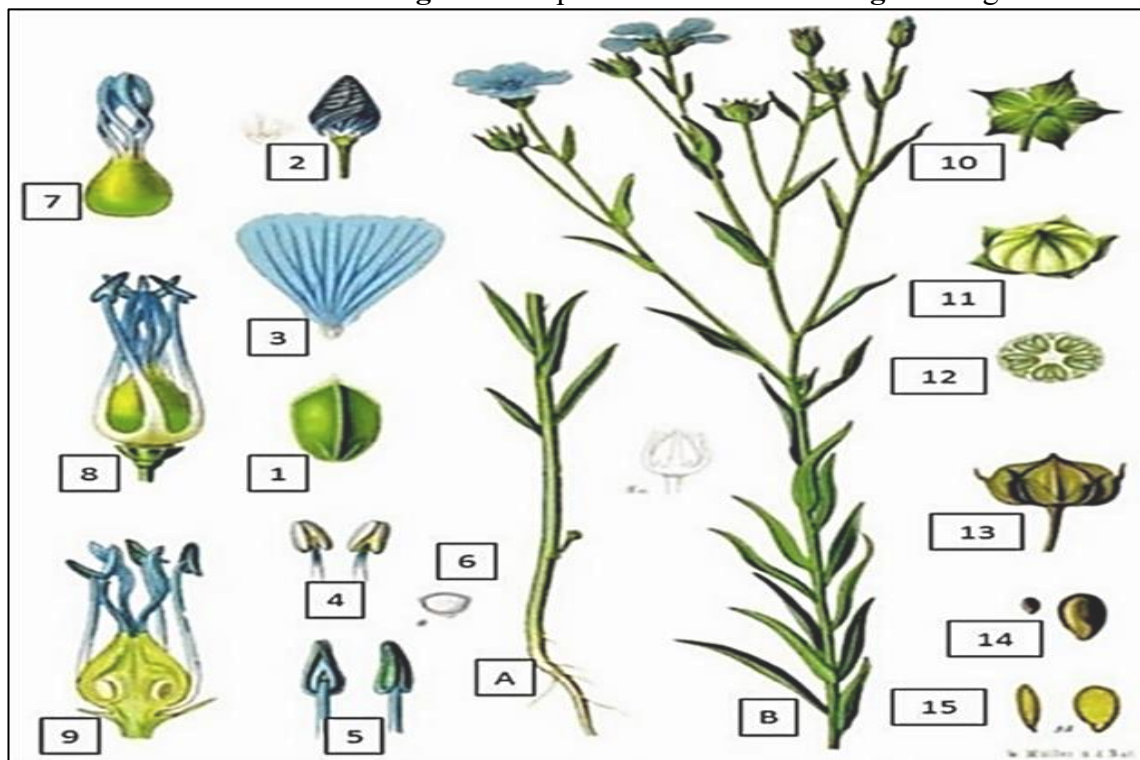


Figure 8 : Planche botanique du lin cultivé (*Linum usitatissimum* L.) (Sébastien, 2015).

## Chapitre 01 : Généralités sur les plantes d'intérêt

A, B : plante ; 1 : sépales ; 2 : bourgeon sans calice ; 3 : pétale ; 4 et 5 : étamines ; 6 : grain de pollen ; 7 : pilon avec 5 colonnes ; 8 et 9 : Fleur sans calice, corolle et étamines ; 10, 11 : fruit non mur (capsule) ; 12 : coupe transversale d'une capsule de lin ; 13 : fruit mature ; 14 : Graine de lin brune ; 15 : coupe longitudinale des graines de lin brune.

Les principales caractéristiques morphologiques de *S. hispanica* sont reportées dans le **tableau 9** :

**Tableau 9** : Caractéristiques morphologiques et structurelles de *L. usitatissimum*.

Aspect	Description	Références
<b>Hauteur</b>	-30 à 100 cm selon la variété et les conditions	—
<b>Feuilles</b>	-Simples, alternes, lancéolées, 3 nervures, 3–13 mm de large, 15–55 mm de long	(Vaisey et Morris, 2003)
<b>Fleurs</b>	-Couleurs : blanc à violet, groupées en cymes bipares terminales	—
<b>Fruits (capsules)</b>	-Capsules sphériques, à 5 loges, contenant 6 à 8 graines (jusqu'à 10)	(Oplinger et al., 2008)
<b>Graines - forme et dimensions</b>	-Ovales, aplaties, lisses ; 3,0–6,4 mm long, 1,8–3,4 mm large, 0,6–1,5 mm épais	(Freeman., 1995)
<b>Graines - texture et goût</b>	-Croquantes, moelleuses, goût de noisette	(Carter., 1996)
<b>Graines - autres dimensions</b>	-5 mm long, 2,5 mm large, 1 mm épais ; poids : 3 à 13 mg ; couleur : jaune à brun	(Carter., 1996)
<b>Structure interne des graines</b>	-Embryon + téguments (testa)	(Gutierrez et al., 2006)
<b>Fonction des téguments</b>	-Protection contre pathogènes et dommages mécaniques	(Attoumbré et al., 2010)
<b>Composition du tégument (int. → ext.)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Couche pigmentée (tanins, couleur)</li> <li>- Fibres longitudinales et transversales</li> <li>-Cellules rondes</li> <li>- Assise mucilagineuse (mucilage)</li> </ul>	(Kadivar., 2001)

### 4.3.2. Description botanique

*L. usitatissimum* est une plante dicotylédone autogame appartenant à la famille des Linaceae et au genre *Linum* (Bloedon *et al.*, 2004). La famille des Linaceae présente une large distribution géographique et comprend environ 300 espèces répertoriées à l'échelle mondiale.

*L. usitatissimum* est généralement cultivé comme plante annuelle dans les zones tempérées, notamment en France. Le cycle cultural débute par le semis, généralement effectué en mars. Une phase végétative s'ensuit, durant laquelle la plante développe ses organes végétatifs (tiges et feuilles), et s'étend sur une période de 45 à 60 jours.

La floraison se manifeste entre la mi-juin et le début du mois de juillet, sur une durée de 15 à 25 jours.

Après la pollinisation, la maturation physiologique des graines intervient sur une période de 30 à 40 jours, marquée par l'accumulation de réserves et la dessiccation des graines en vue de la récolte (Savoire, 2008).

La famille dont appartient cette plante est positionnée dans le royaume des plantes comme suit (Tableau 10) :

**Tableau 10** : Classification taxonomique de *L. usitatissimum*. (Guignard, 2015).

<b>DIVISION</b>	<b>MAGNOLIOPHYTA (ANGIOSPERMES)</b>
<b>CLASSE</b>	Magnoliopsida (Dicotyledones)
<b>SOUS-CLASSA</b>	Rosidae Linales
<b>ORDRE</b>	Linales
<b>FAMILLE</b>	Linaceae
<b>GENRE</b>	<i>Linum</i>
<b>ESPECE</b>	<i>Linum usitatissimum</i> . (espèce cultivée actuellement)

### 4.4. Composition biochimique de *Linum usitatissimum*.

La composition des graines de lin est en moyenne de 30-40% de matières grasses, de 20-25% de protéines, de 20-28% de fibres alimentaires totales, de 4-8% d'eau et de 3-4% de cendres, et l'huile contient des vitamines A, B, D et E, minéraux (Bhatty., 1997).

La composition biochimique de *L. usitatissimum* est résumée comme suit (tableau 11) :

**Tableau 11** : Composition Nutritionnelle de *L. usitatissimum* (par 100 g) (selon USD., 2020 ; Malcolmson *et al.*, 2000 ; Cunnane *et al.*, 1995).

Composant	Quantité approximative	Référence / Source
Énergie	534 kcal	(USDA) (National Nutrient Database)
Protéines	18.3 g	(Malcolmson <i>et al.</i> , 2000 ; USDA)
Lipides	42.2 g	(Malcolmson <i>et al.</i> , 2000 ; USDA)
Acides gras oméga-3 (ALA)	22.8 g	(Malcolmson <i>et al.</i> , 2000 ; Cunnane <i>et al.</i> , 1995)
Glucides	28.9 g	(USDA)
Fibres alimentaires	27.3 g	(Malcolmson <i>et al.</i> , 2000 ; USDA)
Eau	6.96 g	(USDA)
Calcium	255 mg	(USDA ; Health Canada).
Fer	5.7 mg	(USDA)
Magnésium	392 mg	(USDA)
Phosphore	642 mg	(USDA)
Potassium	813 mg	(USDA)
Zinc	4.3 mg	(USDA)
Vitamine B1 (thiamine)	1.6 mg	(USDA)
Lignanes	85–300 mg (SDG*)	(Thompson <i>et al.</i> , 2006 ; Malcolmson <i>et al.</i> , 2000)

### 4.5. Huiles de *Linum usitatissimum*.

L'huile végétale *L. usitatissimum* (HL) est présente environ 30 à 45 % du poids sec de la graine, ce qui fait d'elle une source très riche en matières grasses (Goyal *et al.*, 2014 ; Oomah *et al.*, 1998). Cette huile se caractérise par sa forte teneur en acides gras non saturés, surtout l'acide alpha-linolénique (oméga-3), l'acide linoléique (oméga-6) et l'acide oléique (oméga-9). Elle a



aussi des quantités remarquables d'acides gras saturés comme l'acide palmitique et stéarique.

Grâce à ça valeur nutritive, l'huile de lin a des caractéristiques antioxydantes et anti-inflammatoires et donc très utile dans les domaines de la nutrition, de la médecine et des cosmétiques.

#### **4.6. Composition d'huiles de *Linum usitatissimum*.**

Les graines de lin (*Linum usitatissimum* L.) sont particulièrement reconnues pour leur richesse en huile, dont la composition nutritionnelle en fait un produit d'intérêt pour les industries alimentaires, pharmaceutiques et cosmétiques.

L'huile extraite des graines de lin est notamment appréciée pour sa forte teneur en acides gras polyinsaturés, en particulier l'acide  $\alpha$ -linolénique (oméga-3).

Le tableau ci-dessous présente les principales composantes de l'huile végétale issue des graines de lin (**tableau 12**).

**Tableau 12 : Composition de HL**

Catégorie	Composant spécifique	Quantité (moyenne)	Source / Référence fiable
<b>Triglycérides</b>	Triglycérides totaux	~99,8 g	(CIQUAL – ANSES., 2023)
	Mono-, di-, et triglycérides	Triglycérides >95%	(Nutrionio, s.d.)
<b>Acides gras</b>	Acide alpha-linolénique (ALA, oméga-3)	53–56 g	(Guide des aliments, s.d)
	Acide linoléique (LA, oméga-6)	13,5–15,5 g	(Guide des aliments, s.d)
	Acide oléique (oméga-9)	18–20 g	(LaNutrition.fr, s.d.)
	Acides gras saturés	9–10 g	(CIQUAL – ANSES., 2023)
	Acides gras trans	0,02–0,09 g	(Nutrionio, s.d.)
<b>Vitamines liposolubles</b>	Vitamine E ( $\alpha$ -tocophérol)	8,99–17,5 mg	(USDA, 2020)
	Vitamine K1	9–10 $\mu$ g	(USDA, 2020)
<b>Stérols végétaux</b>	Phytostérols totaux	100–200 mg	(Pennington <i>et al.</i> , 2007) (Journal of Food Composition)
	$\beta$ -sitostérol	Principal	(Pennington <i>et al.</i> , 2007)
<b>Composés mineurs</b>	Lignanes (SDG)	0,3–0,6 mg	(Nair <i>et al.</i> , 2005)
	Coenzyme Q10 (traces)	<1 mg	(ScienceDirect, s.d.)
<b>Minéraux</b>	Calcium, Phosphore, Zinc (traces)	<2 mg chacun	(La Fourche, 2023) (Blog Nutrition)
<b>Autres</b>	Cholestérol	0 mg	(CIQUAL – ANSES, 2023)
	Protéines, glucides, fibres	0 mg	(CIQUAL – ANSES, 2023)

### 5. Généralité sur *Foeniculum vulgare* Mill.

#### 5.1. Définition

*Foeniculum vulgare* (*F. vulgare*) ou fenouil est connue depuis l'antiquité et largement utilisé pour ses propriétés thérapeutiques en usage médical et culinaire (**Hendawy *et al.*, 2010**). Le genre *Foeniculum* lui a été attribué par les Romains est dérive du mot latin foenum, c'est-à-dire herbe (**Kaur *et al.*, 2010**). Il était bien connu dans sevilisation anciens et a été cultivé par les Romains antiques pour l'usage de ses graines aromatiques (**Vienna *et al.*, 2005**). En arabe, le fenouil est communément appelé "besbes". Les huiles essentielles du fenouil (HF) sont largement utilisées dans plusieurs domaines telle que l'industries cosmétique, pharmaceutique et alimentaire (**Lazouni *et al.*, 2007**).

#### 5.2. Origine et distribution géographique

Le *F. vulgare* est une plante originaire de l'est du bassin méditerranéen. On le retrouve dans plusieurs pays d'Europe centrale ainsi que dans la région méditerranéene (**Vienna *et al.*, 2005**). Il est largement cultivé dans diverses régions tempérées et tropicales du monde, où il sert principalement d'épice en cuisine (**Singh *et al.*, 2006**).

Le *F. vulgare* est également cultivé et présent en Iran, en Inde, en Indonésie, au Pakistan, en Chine, en Egypte et en France (**Garnéro., 1996**).

#### 5.3. Description de la plante

##### 5.3.1. Description morphologique

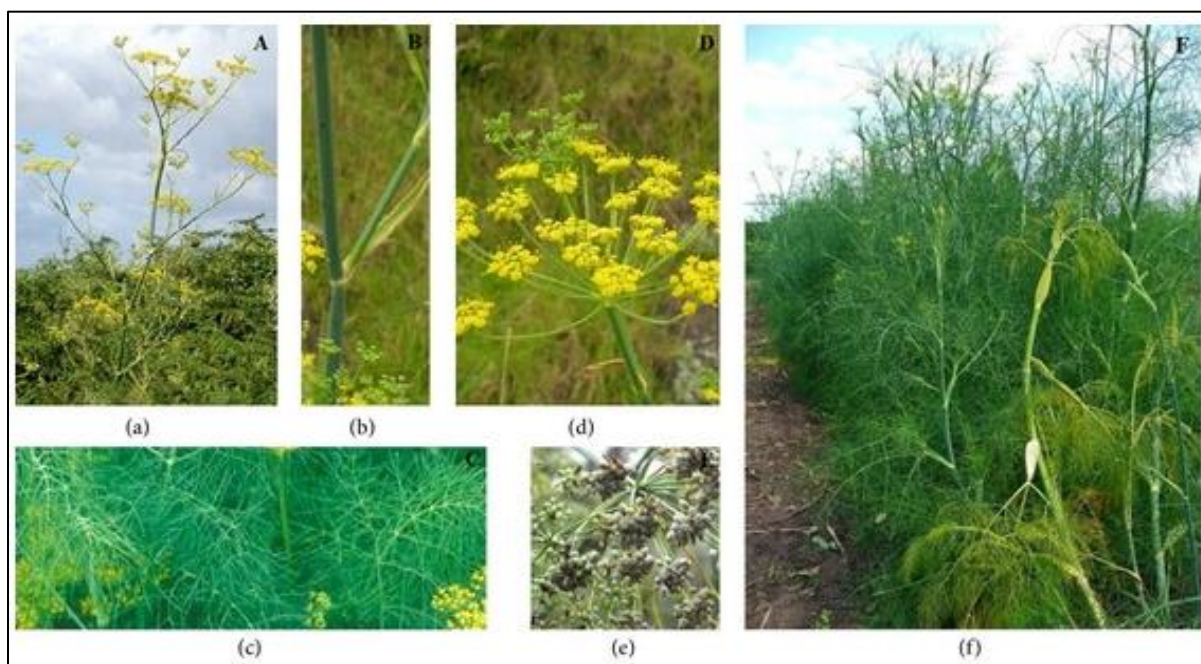
*F. vulgare* est une plante vivace, a une hauteur de 1,5 à 2 mètres. Elle se caractérise par une tige érigée, cannelée et ramifiée, des feuilles très découpées, filiformes et plumeuses. Les fleurs sont petites, jaunes, disposées en ombelles terminales. Les fruits, souvent confondus avec les graines, sont des schizocarpes allongés et légèrement arqués, contenant une forte concentration d'huiles essentielles.

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques morphologiques et structurales de *F. vulgare*.

**Tableau 13 :** Caractéristiques morphologiques et structurelles de *F. vulgare*.

Caractéristique	Description	Références
<b>Tige</b>	Les tiges sont droites, jaunâtre-vertes pâles, sillonnées et embranchées, s'élèvent jusqu'à 80 à 200 cm.	(Vienna <i>et al.</i> , 2005 ; Kaur et Arora., 2010)
<b>Feuilles</b>	Les feuilles élèvent jusqu'à 40 cm de longueur, finement disséquées, avec des segments finaux filiformes d'environ 0,5 mm de largeur.	(Vienna <i>et al.</i> , 2005 ).
<b>Fleurs</b>	Une ombelle contient 20 à 50 fleurs jaunes claires minuscules sur des courts pédicules.	(Stefanini <i>et al.</i> , 2006).
<b>Graines</b>	Les graines varient en longueur, largeur, goût et autres caractères.	(Vienna <i>et al.</i> , 2005 ).
<b>Forme des graines</b>	Elles ont une forme presque cylindrique avec une base arrondie et un sommet plus étroit, couronnées avec un grand stylopode.	(Vienna <i>et al.</i> , 2005 ).
<b>Dimensions des graines</b>	Généralement de 3 à 12 mm de longueur et de 3 à 4 mm de largeur.	(Vienna <i>et al.</i> , 2005 ).
<b>Couleur des graines</b>	Elles sont vert-bleu d'abord, puis deviennent brun verdâtre quand elles sont mûries.	(Kaur et Arora., 2010).
<b>Odeur des graines</b>	Une odeur forte et douce.	(Kaur et Arora., 2010).

Les figures ci-dessous présenté la morphologie générale de *F. vulgare*.



**Figure 9 :** Morphologie générale du fenouil (*Foeniculum vulgare* L.) montrant différentes parties de la plante.

a) dans son habitat naturel ; b) tige ; c) les feuilles ; d) les inflorescences et les fleurs ; e) les fruits ; et f) la population de *F. vulgare* Mill. (Badgajar et al., 2014)

### 5.3.2. Description botanique

Le fenouil (*Foeniculum vulgare*) est une plante herbacée annuelle ou bisannuelle appartenant à la famille des Apiaceae, qui regroupe également des espèces aromatiques et médicinales comme l'anis, la coriandre et le carvi. Il possède une longue racine fuselée, et son inflorescence est constituée d'ombelles composées aux pédoncules allongés, regroupant de 4 à 25 rayons de longueur presque égale. Ses fleurs, régulières et radiales, présentent un ovaire inférieur divisé en deux loges. Le fruit est un diakène formé de deux méricarpes (Babulka, 2004).

Le genre *Foeniculum* ne compte qu'une seule espèce reconnue, *Foeniculum vulgare*, qui se décline en plusieurs sous-espèces selon leur usage (sauvage ou cultivé) et leurs caractéristiques organoleptiques.

La famille dont appartient cette plante est positionnée dans le royaume des plantes comme suit (**Tableau 13**) :

**Tableau 14 :** Classification du *F. vulgare*. (Guignard, 2007).

<b>REGNE</b>	<b>PLANTAE</b>
<b>CLASSE</b>	Magnoliopsida
<b>SOUS-CLASSE</b>	Rosidae
<b>ORDRE</b>	Apiales
<b>FAMILLE</b>	Apiaceae
<b>GENRE</b>	<i>Foeniculum</i>
<b>ESPECE</b>	<i>Foeniculum vulgare</i> L.

Cette classification repose sur des études morphologiques, chimiques et génétiques récentes, confirmant l'identité distincte de *F. vulgare* au sein de la famille Apiaceae (Pimenov et Leonov, 1993 ; Downie et al., 2001).

#### 5.4. Compositions biochimiques de *Foeniculum vulgare*.

En général les graines de fenouil contiennent entre 14 à 16% des lipides, 15 jusqu'à 18% des protéines et peuvent avoir jusqu'à 40% de fibre. Elles ont aussi une quantité importante de minéraux comme le calcium, fer et magnésium, en plus des huiles essentielles comme le Limonène, l'Estragole, le Trans- anéthol et la Fenchon qui ont beaucoup de bon effet.

La composition biochimique des graines de fenouil est résumée dans le tableau 15 :

**Tableau 15 :** Composition Nutritionnelle de *F. vulgare* (par 100 g) (selon **USDA, 2020** ; **Gupta et al., 2013** ; **Ozcan & Chalchat, 2006** ; **Pareek et al., 2011**).

Composant	Quantité approximative	Référence / Source
Énergie	345 kcal	(USDA) National Nutrient Database
Protéines	15.8 g	(USDA)
Lipides	14.9 g	(USDA)
Acides gras polyinsaturés	~9 g	(USDA ; Gupta et al., 2013)
Glucides	52.3 g	(USDA)
Fibres alimentaires	39.8 g	(USDA)
Eau	8.8 g	(USDA)
Calcium	1196 mg	(USDA ; Kapoor et al., 2010)
Fer	18.5 mg	(USDA)
Magnésium	385 mg	(USDA)
Phosphore	487 mg	(USDA)
Potassium	1694 mg	(USDA)
Zinc	3.7 mg	(USDA)
Vitamine C	21 mg	(USDA)
Vitamine A (RAE)	135 µg	(USDA)
Huiles essentielles	1.5–6.5% du poids sec	(Ozcan et Chalchat, 2006) (Principalement anéthol, fenchone, estragole)
Antioxydants (polyphénols)	~50–100 mg/100 g	(Pareek et al., 2011)

### 5.5. Huiles essentielles de *Foeniculum vulgare*

Les huiles essentielles sont des substances naturelles, volatiles, aromatiques et thermosensible, elles sont localisées dans différentes parties des plantes, comme les feuilles, les tiges, les racines et les fleurs, et sont responsables de son odeurs caractéristiques (**Bakkali et al., 2008**).

Environ 40 % des médicaments contiennent des principes actifs dérivés des plantes, et les huiles essentielles sont intégrées dans diverses formes galéniques, telles que les sirops, les gouttes, les crèmes et les capsules (**Wichtl, 2003**).

Parmi ces huiles, nous avons observé que l'huile de *Foeniculum vulgare* (fenouil) se distingue par son arôme anisé prononcé, dû à sa forte teneur en composés volatils. Elle est largement utilisée comme agent aromatisant dans l'industrie alimentaire. Plus de 87 composés volatils ont été identifiés dans l'huile essentielle de fenouil, dont la concentration varie selon les parties de la plante (racines, tiges, jeunes pousses, fleurs et fruits) (**Badgujar et al., 2014 ; Milenković et al., 2022**).

### 5.6. Composition d'huile de *Foeniculum vulgare*.

L'huile extraite des graines de *Foeniculum vulgare* (fenouil) est réputée pour ses propriétés aromatiques, digestives et antioxydantes. Elle est riche en composés volatils comme l'anéthol, le fenchone et l'estragole, qui lui confèrent une forte activité biologique et un arôme caractéristique. Utilisée traditionnellement en médecine et dans l'industrie agroalimentaire, cette huile présente également un intérêt dans les secteurs cosmétique et pharmaceutique grâce à ses effets antimicrobiens, carminatifs et anti-inflammatoires.

Le tableau ci-dessous présente les principales composantes de l'huile végétale issue des graines de fenouil (**tableau 16**) :



**Tableau 16 :** Composition d'huile de *Foeniculum vulgare*.

Catégorie	Composant spécifique	Quantité moyenne(%)	Référence
<b>Composés volatils</b>	Trans-anéthole	44–88 %	(Gupta <i>et al.</i> , 2013 ; Kacem <i>et al.</i> , 2006)
	Fenchone	2–25 %	(Gupta <i>et al.</i> , 2013 ; Kacem <i>et al.</i> , 2006)
	Estragole	3–15 %	(Gupta <i>et al.</i> , 2013 ; Kacem <i>et al.</i> , 2006)
	Limonène	0,5–10 %	(Gupta <i>et al.</i> , 2013)
	$\alpha$ -Pinène	0,2–2,8 %	(Gupta <i>et al.</i> , 2013)
	1,8-Cinéole	0,5–2,2 %	(Gupta <i>et al.</i> , 2013)
	p-Anisaldéhyde	0,9–1,3 %	(Kacem <i>et al.</i> , 2006)
<b>Acides gras</b>	Acide oléique (C18:1)	33–64 %	(USDA ; Raffo <i>et al.</i> , 2004)
	Acide linoléique (C18:2)	26–54 %	(USDA ; Raffo <i>et al.</i> , 2004)
	Acide palmitique (C16:0)	6–6,9 %	(USDA ; Raffo <i>et al.</i> , 2004)
	Acide stéarique (C18:0)	2–2,4 %	(USDA ; Raffo <i>et al.</i> , 2004)
	Acide linolénique (C18:3)	0,1–3,6 %	(USDA ; Raffo <i>et al.</i> , 2004)
	Acide myristique (C14:0)	0,3–1,5 %	(USDA ; Raffo <i>et al.</i> , 2004)
<b>Propriétés physico-chimiques</b>	Indice d'iode	103	(Nauman Sab Oil Co., 2023)
	Indice de saponification	175	(Nauman Sab Oil Co., 2023)
	Densité (20 °C)	0,919–0,923	(Nauman Sab Oil Co., 2023)
	Indice de réfraction	1,4718–1,4790	(Nauman Sab Oil Co., 2023)
	Humidité	0,5 %	(Nauman Sab Oil Co., 2023)
	Acides gras libres	0,03 %	(Nauman Sab Oil Co., 2023)
	Insaponifiables	1 %	(Nauman Sab Oil Co., 2023)
<b>Activité biologique</b>	Activité antioxydante (DPPH)	24,45 $\pm$ 3,74 %	(Bachir <i>et Benali</i> , 2012)
	Activité antimicrobienne	Inhibe aureus	(Bachir <i>et Benali</i> , 2012)

### 6. Méthodes d'extraction

L'extraction des huiles végétales et essentielles est essentielle pour valoriser les plantes à usages variés. Le choix de la méthode dépend du type d'huile et de la plante. Il existe des techniques traditionnelles (comme la distillation) et modernes (ultrasons, micro-ondes), chacune ayant ses avantages et limites.

#### 6.1. Hydrodistillation

L'hydrodistillation est une de mes méthodes les plus claires et ordinaires pour sortir des huiles essentielles. Celle-ci consiste à mettre directement les plantes dans l'eau, puis à les faire bouillir sous pression normale. La vapeur emporte ces petites particules qui se condensent après et sont récupérées par un système froid (**Chemat *et al.*, 2017**).

Le temps de distillation varie selon le type de plante, sachant que les organes ligneux (bois) prennent plus de temps que les herbes.

Cette différence vient du lieu où se trouvent les huiles essentielles :

- Superficiel : les poches cèdent vite à la chaleur → relâchement rapide.
- Interne : les petits éléments doivent passer par les tissus des plantes avant d'arriver en haut et de s'échapper → travail plus lent (**Pourmortazavi *et Hajjmirsadeghi*, 2007**).

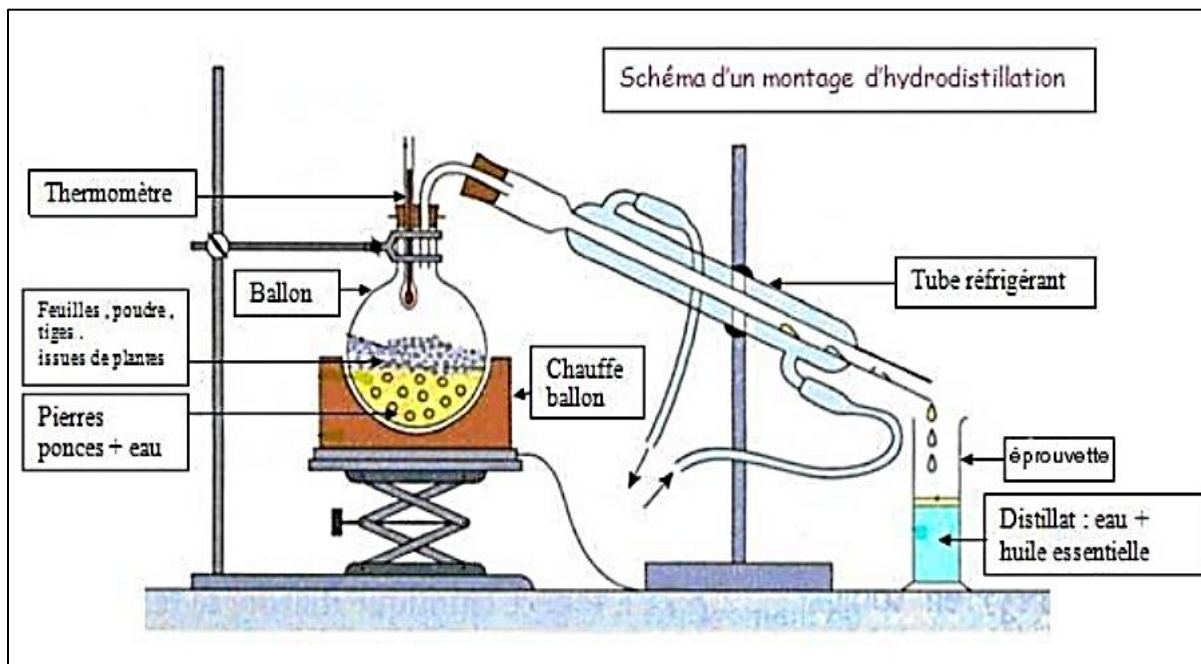


Figure 10 : Schéma du principe de la technique d'hydrodistillation.

### 6.2. Pressage à froid

L'extraction à froid permet d'obtenir une huile plus pure, appelée huile vierge, car elle est extraite en une seule pression, sans traitement chimique ni chauffage excessif. Ce procédé préserve la composition naturelle de l'huile, notamment les vitamines, Provitamines, phytostérols, phospholipides et le squalène, ainsi que certains acides gras, qui sont des éléments clés de la valeur nutritionnelle de l'huile de graines (Caili *et al.*, 2006 ; Fruhwirth *et Hermetter* , 2007 ; Sener *et al.*, n.d.). L'huile est extraite à froid à partir de graines récoltées à la mi-automne. Après un lavage et un séchage immédiat jusqu'à 7 % d'humidité, les graines sont séchées à température inférieure à 50 °C et stockées, puis nettoyées (élimination des impuretés métalliques et organiques). Elles sont ensuite pressées mécaniquement à l'aide d'une presse à vis. L'huile obtenue est clarifiée par sédimentation ou filtration, puis conditionnée dans des bouteilles en verre foncé pour préserver ses composants actifs contre la lumière, la chaleur et l'oxygène (Vujasinovic *et al.*, 2010).

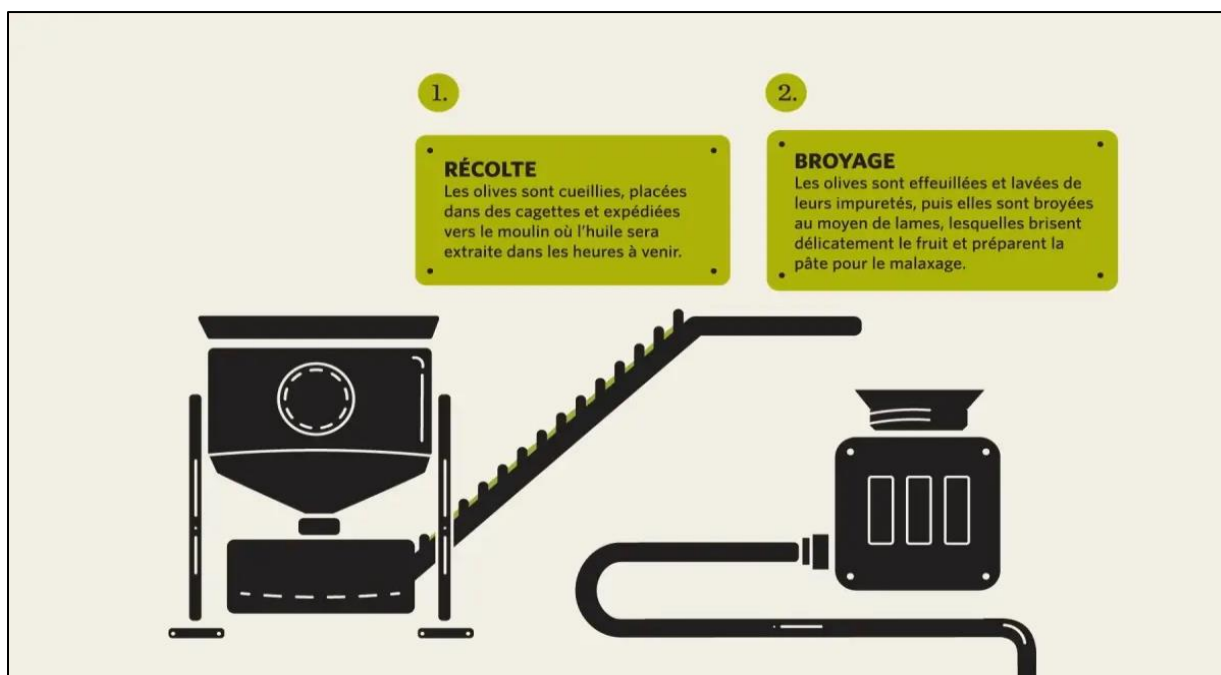
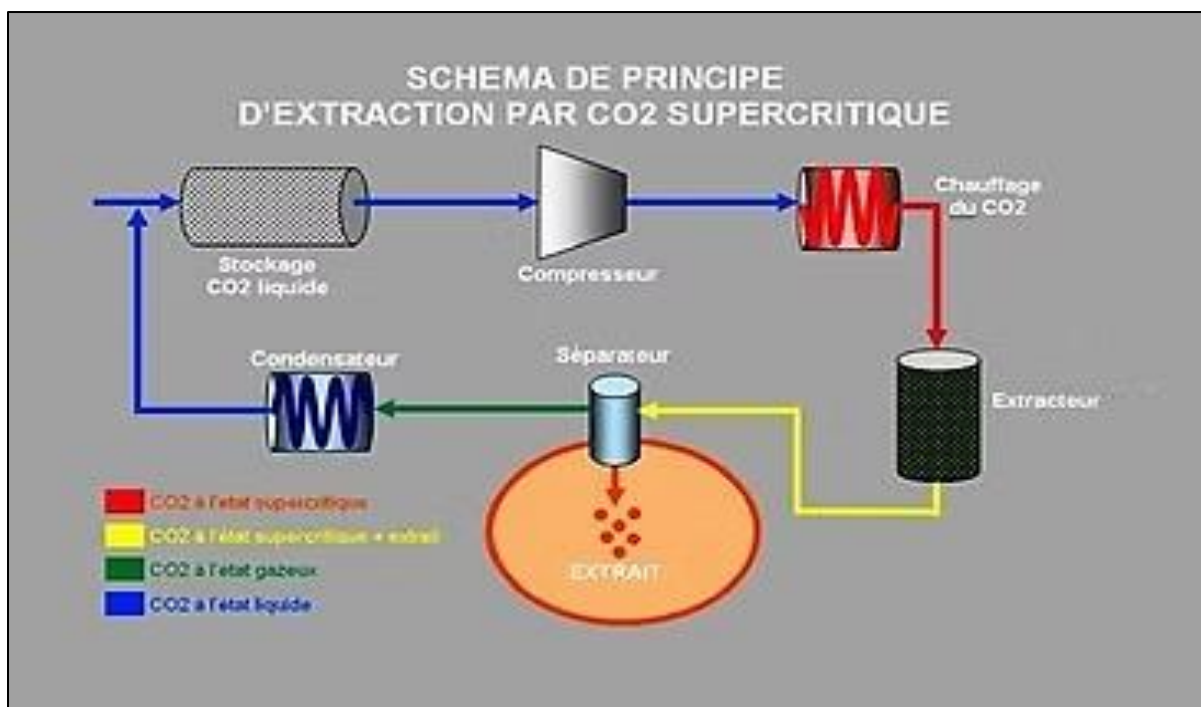


Figure 11 : Schéma de la technique d'extraction à froid.

### 6.3. Extraction par CO<sub>2</sub> (dioxyde de carbone)

L'extraction par dioxyde de carbone est largement utilisée pour l'extraction d'huiles végétales (Bernardo-Gil *et al.*, 2004 ; Wenli *et al.*, 2004). Cette méthode se distingue par son caractère économique et écologique, permettant une extraction rapide avec des rendements élevés (Ayyildiz, Topkafa, and Kara 2019) qui permet une technique de référence (Mariod *et al.*, 2010 ; Sovilj, 2010). Le CO<sub>2</sub> supercritique est un solvant non toxique, inodore, inflammable, chimiquement stable, peu coûteux et ne laisse aucun résidu dans l'extrait (Ayyildiz *et al.*, 2019). Sa température critique modérée (31,1 °C) et sa pression critique (7 380 kPa) en facilitent l'utilisation (Ayyildiz *et al.*, 2019). Grâce à ses excellentes propriétés de transfert de masse (fort coefficient de diffusion, faible viscosité, absence de tension superficielle), le SFE-CO<sub>2</sub> pénètre efficacement les matrices végétales et améliore significativement l'extraction (Li *et al.*, 2017).



**Figure 12 :** Schéma de la technique d'extraction par le CO<sub>2</sub> supercritique.

Il y a d'autres méthodes couramment utilisées pour l'extraction des huiles essentielles, chacune ayant ses avantages et inconvénients spécifiques. Le tableau ci-dessous résume les principales techniques employées dans ce domaine (**tableau 17**).

**Tableau 17 :** Principales méthodes d'extraction des huiles essentielles et végétales à partir des plantes

N°	Méthode	Type d'huile	Principe général	Avantages	Inconvénients	Références
1	Distillation à la vapeur	Essentielle	Passage de vapeur à travers les plantes	Bonne qualité, préserve les composés	Nécessite un équipement spécialisé	(Reverchon <i>et</i> De Marco, 2006)
2	Distillation à l'eau et à la vapeur	Essentielle	Immersion partielle des plantes avec vapeur	Adaptée aux plantes fraîches	Contrôle thermique délicat	(Lang <i>et</i> Wai, 2001)
3	Extraction par solvants organiques	Essentielle & végétale	Solvants (ex. hexane) utilisés pour dissoudre les huiles	Très haut rendement	Résidus de solvants, usage restreint en alimentaire	(Chemat <i>et al.</i> , 2006 ; Latif <i>et</i> Anwar, 2011)
4	Extraction assistée par ultrasons	Essentielle & végétale	Ondes ultrasonores brisant les parois cellulaires	Extraction rapide, bon rendement	Peu adaptée à l'échelle industrielle	(Chemat <i>et al.</i> , 2017)
5	Extraction assistée par micro-ondes	Essentielle & végétale	Échauffement rapide interne par micro-ondes	Gain de temps, économie d'énergie	Risque d'altération de composés sensibles	(Lucchesi <i>et al.</i> , 2004 ; Saeed <i>et al.</i> , 2022)
6	Pression à chaud	Végétale	Pressage avec chauffage modéré	Meilleur rendement que pression à froid	Perte partielle de qualité nutritionnelle	(Gunstone, 2011)

# **Chapitre 02 :**

## **Métabolites secondaires**

### 1. Généralité sur les métabolites secondaires

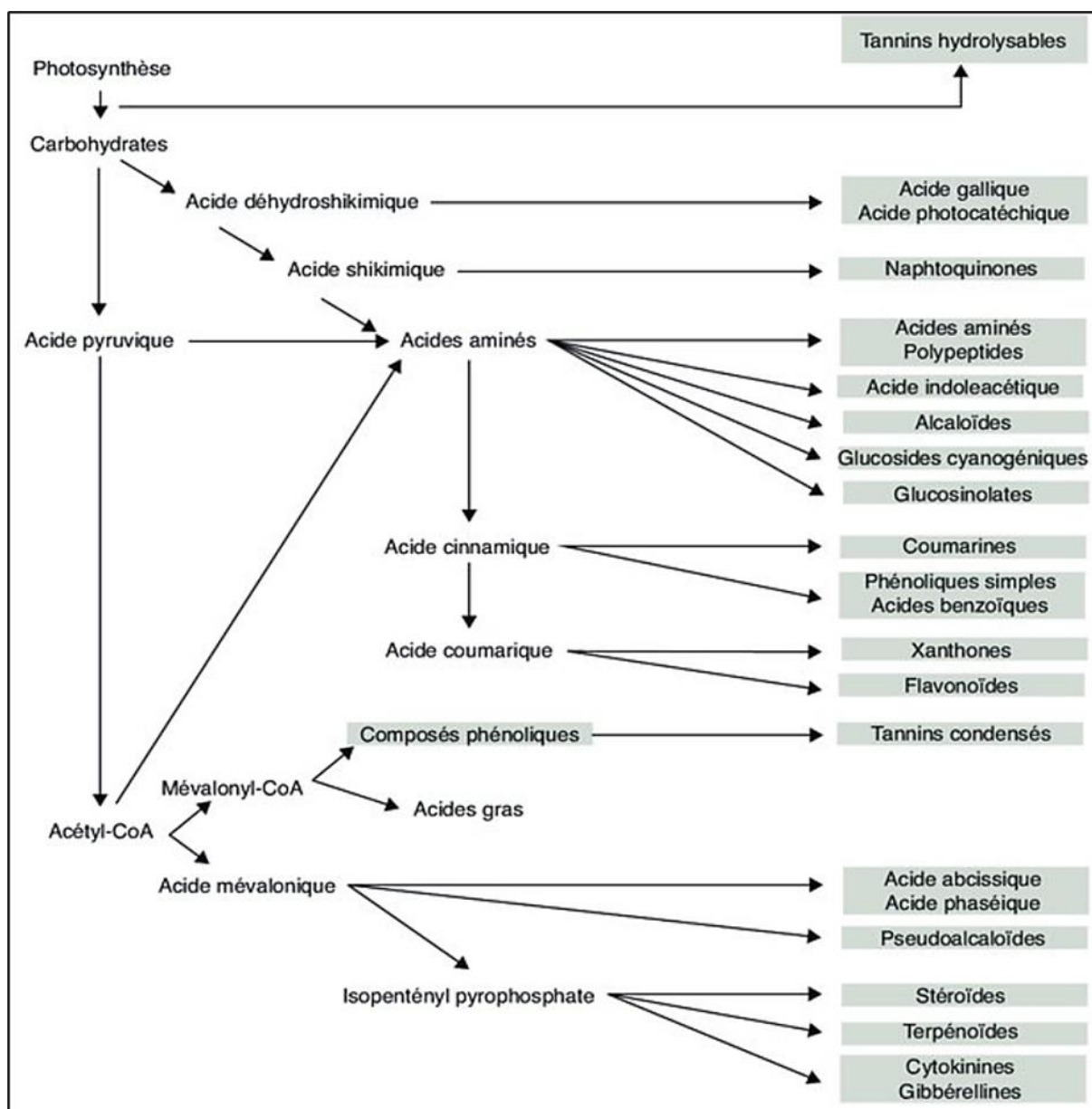
La plante est le siège d'une activité métabolique intense, conduisant à la synthèse de nombreux composés bioactifs. Ce métabolisme est lié aux conditions de vie spécifiques de l'organisme végétal. En effet, ne pouvant fuir son environnement, la plante est toujours exposée à divers facteurs de stress : les prédateurs, les microorganismes ou les agents pathogènes...etc., pour y faire face, elle a développé un métabolisme spécifique qui leur permet de produire une large gamme de substances protectrices : les métabolismes secondaires (MS).

### 2. Définition

Les MS sont des composés organiques de faible masse moléculaire (<1000 généralement), produits de manière spécifique et non constante par certaines espèces végétales. Leur biosynthèse dépend de facteurs génétiques, développementaux et environnementaux (**Dewick 2009**). Bien que leur fonction précise reste parfois obscure, de nombreuses molécules jouent des rôles biologiques essentiels : défense chimique, attraction des pollinisateurs ou communication interspécifique via des substances volatiles ou des pigments (**Wink, 2003**). Ces composés sont dérivés du métabolisme primaire, à partir de précurseurs tels que les acides aminés, sucres ou acides organiques, auxquels ils ajoutent complexité et spécificité taxonomique (**Dewick, 2009**). Autre fois considérés comme des déchets métaboliques, les métabolites secondaires sont aujourd'hui reconnus pour leur rôle clé dans la défense écologique, la signalisation cellulaire, et l'adaptation aux stress environnementaux (**Wink, M. 2008**).

Les MS se divisent en 3 grandes classes : Les composés phénoliques ; les alcaloïdes, les terpènes (**Wink, 2010**) et d'autres composés secondaires ont également été identifiés chez les plantes sont les glycosides (**John, 2000**).

Les voies de synthèse des métabolismes secondaires se représentent ci-dessous dans la **figure 13** :



**Figure 13 :** Voies principales de synthèse des composés secondaires chez les plantes supérieures (d'après Schoonhoven *et al.*, 2005).

### 3. Classification des métabolites secondaires

À l'inverse des produits du métabolisme primaire qui sont présents chez toutes les plantes, le profil chimique des composés secondaires varie énormément et est considéré comme résultant des pressions évolutives auxquelles sont soumises les différentes espèces de plantes (Bate-Smith, 1984 ; Ehrlich *et* Raven, 1964). On regroupe habituellement ces divers composés en deux catégories en fonction de leur biosynthèse : les composés phénoliques d'un côté, et les composés azotés tels que les alcaloïdes, les glycosides et les terpénoïdes de l'autre



(Bohm, 1977 ; Torssell, 1983 ; Wiermann, 1981). Néanmoins, ils peuvent également être classés en quatre catégories :

- Les composés phénoliques (ou polyphénols)
- Les terpenoïdes
- Les alcaloïdes

### 3.1. Composés phénoliques

Les Composés phénoliques sont des métabolites secondaires végétaux qui constituent l'un des groupes de substances les plus courants et les plus répandus dans les plantes (Sytar Oksana, 2012).

Ils sont présents dans toutes les parties des végétaux supérieurs (racines, tiges, feuilles, fleurs, pollens, fruits, graines et bois) et sont impliqués dans de nombreux processus physiologiques comme la croissance cellulaire, la rhizogenèse, la germination des graines ou la maturation des fruits (Boizot, N.2006). Ils proviennent de deux voies de synthèse principales : la voie du shikimate et la voie de l'acétate (Lugasi *et al.*, 2003). Sa structure est constituée d'un cycle aromatique portant un ou plusieurs groupes hydroxyles (phénol ou polyphénol).

La structure de base des composés phénoliques se montre ci-dessous dans la figure 14 :

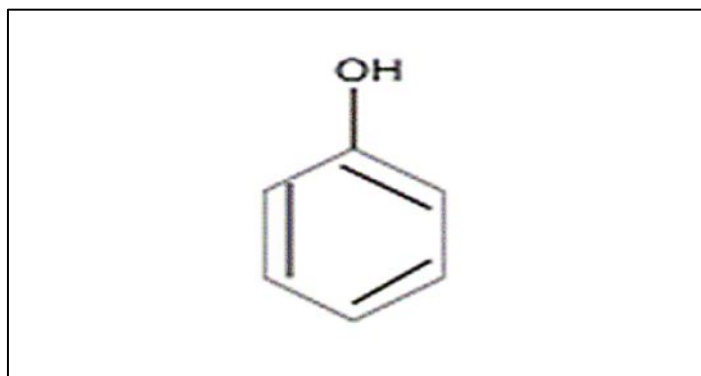

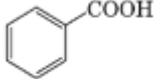
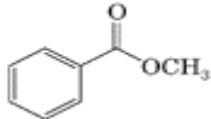
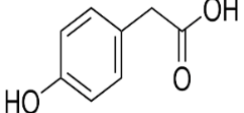
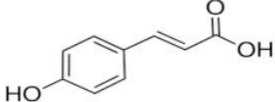
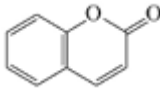
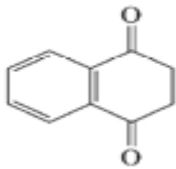
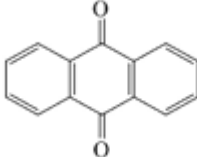
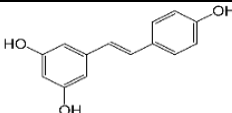


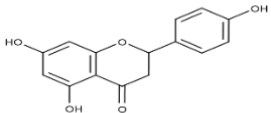
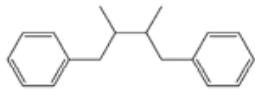
Figure 14 : Structure de base des polyphénols (Elie, F.2022).

#### 3.1.1. Classification des composés phénoliques

Les composés phénoliques peuvent être regroupés en de nombreuses classes selon leur fonction (Sytar Oksana 2012). Ces classes se représentent ci-dessous dans le tableau 18 :

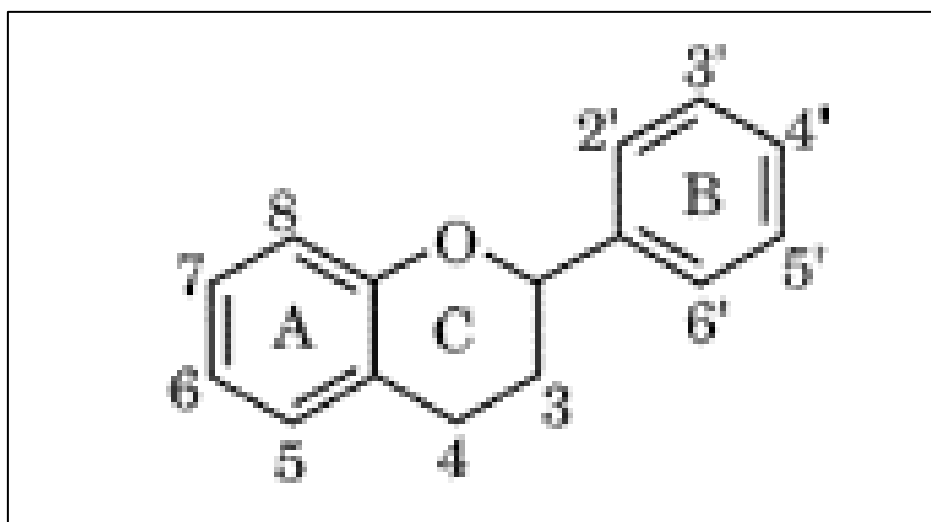
**Tableau 18 :** Squelettes structuraux des composés phénoliques (Arráez-Román *et* Segura Carretero, 2016).

Classification	Squelette	Exemple	Structure basique
Phénol simple	C6	Acide benzoquinones	
Acide phénolique	C6_C1	Acide gallique	
Acétophénone	C6_C2	Gallactophenone	
Acide phénylacétique	C6_C2	Acide p- Hydroxyphényl acétique	
Acide hydroxycinnamique	C6_C3	Acide p- coumarique	
Coumarines	C6_C3	Esculetine	
Naphthoquinones	C6_C4	Juglone	
Xanthones	C6_C1_C6	Mangiferin	
Stilbenes	C6_C2_C6	Resveratol	

Flavonoïdes	C6_C3_C6	Naringenin	
Lignanes	(C6_C3) <sub>2</sub>	Syringaresinol	

### 3.1.1.1. Flavonoïdes

Les flavonoïdes sont une famille de phénoliques chimiquement définie qui comprend plusieurs milliers de composés. Ceux-ci ont une structure de base C6—C3—C6 (Arráez-Román and Segura Carretero, 2016). Cette structure se représente ci-dessous dans la figure 15 :



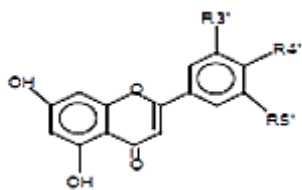
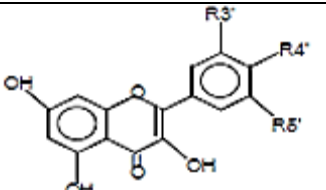
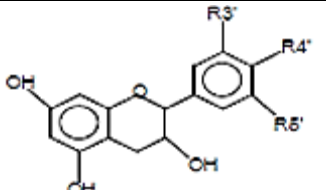
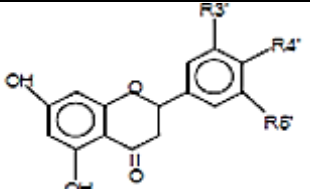
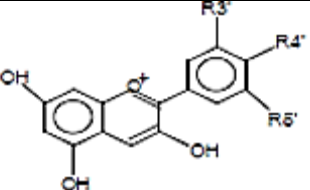
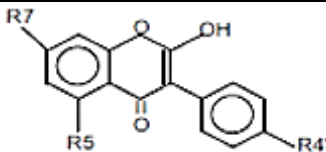
**Figure 15 :** Structure de base des flavonoïdes indiquant les cycles (A, C et B) et le nombre de substitutions

### • Classification des flavonoïdes

Plusieurs sous-classes de flavonoïdes qui partagent une structure commune composée de 2 cycles aromatiques reliés par 3 atomes de carbone formant un hétérocycle oxygéné. Se diviser en 6 sous-classes selon le type d'hétérocycle impliqué : flavanols, flavones, isoflavones, flavanones, anthocyanidines et flavanols (catéchines et pro anthocyanidines)

Les flavonoïdes sont classés selon leur structure chimique se montre ci-dessous dans le tableau 19 :

**Tableau 19 :** Les principales classes des flavonoïdes (Shahidi *et al.*, 2019).

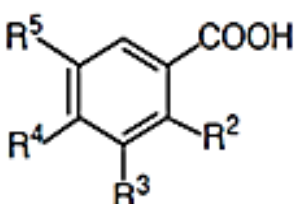
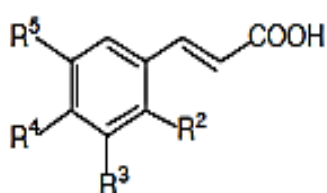
Classes	Structures chimiques	R3'	R4'	R5'	Exemples
Flavones		H	OH	H	Apigénine
		OH	OH		Lutéoline
		OH	OCH <sub>3</sub>	H	Diosmétine
Flavonols		H	OH		Kaempférol
		OH	OH		Quercétine
		OH	OH	OH	Myricétine
Flavanols		OH	OH	H	Catéchine
Flavanones		H	OH	H	Naringénine
		OH	OH	H	Eriodictyol
Anthocyanidines		H	OH	H	Pélagonidine
		OH	OH	H	Cyanidine
		OH	OH	OH	Delphinidine
Isoflavones		OH	OH	OH	Génistéine
		H	O-Glu	OH	Daidzéine

### 3.1.1.2. Acides phénoliques

Les acides phénoliques sont une famille de composés phénoliques, ces sont également appelés hydroxybenzoates, leur principal composant étant l'acide gallique (Crozier *et al.*, 2007) il se répartissent en deux familles : les acides hydroxybenzoïques (C6-C1), les acides hydroxycinnamiques (C6-C3) (Elie, 2022).

#### ➤ Classification des acides phénoliques

Tableau 20 : Principales classes des acides phénoliques (Montpellier, 2011).

<b>Acides hydroxybenzoïques</b>  squelette carboné (C6-C1)	R <sup>2</sup>	R <sup>3</sup>	R <sup>4</sup>	R <sup>5</sup>	<b>Acides</b>  squelette carboné (C6-C3) hydroxycinnamiques
Acide benzoïque	H	H	H	H	Acide cinnamique
Acide salicylique	OH	H	H	H	Acide ortho-coumarique
Acide parahydroxybenzoïque	H	H	OH	H	Acide para-coumarique
Acide gentisique	OH	H	OH	H	
Acide protocatéchique	H	H	OH	OH	Acide caféique
Acide vanillique	H	OCH <sub>3</sub>	OH	H	Acide férulique
Acide gallique	H	OH	OH	OH	
Acide syringique	H	OCH <sub>3</sub>	OH	OCH <sub>3</sub>	Acide sinapique

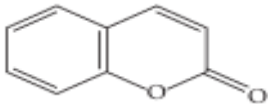
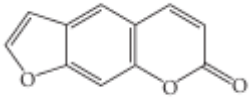
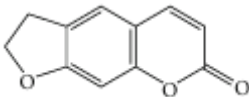
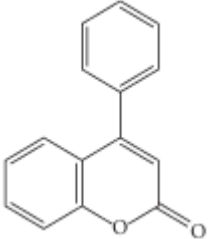
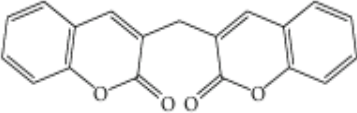
### 3.1.1.3. Coumarines :

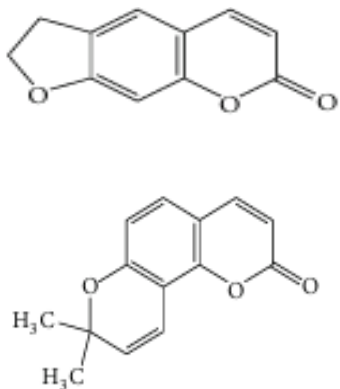
Les coumarines sont parties de famille des composés phénoliques, sont constituées de cycles fusionnés de benzène et de  $\alpha$ -pyrone (Pandey *et Gokhale*, 2018), nous avons identifié plus de 1 300 coumarines ont été identifiées comme métabolites secondaires issus de plantes, de bactéries et de champignons (Venugopala *et al.*, 2013).

- **Classification des coumarines**

Les coumarines naturelles sont principalement classées en six types, selon leur structure chimique, se représente ci dissous dans le tableau 21 :

**Tableau 21** : classification des coumarines (Venugopala *et al.*, 2013).

Type de coumarine	Structure de coumarines	Exemple
<b>Coumarines Simple</b>		Coumarin, Esculetin, Ammosesinol, Ostruthin, Osthole, Novobiocin, Coumermycin, Chartreusin, Fraxin, Umbelliferone, Fraxidin
<b>Furanocoumarines</b>		Imperatorin, Psoralen, Bergapten, Methoxsalen, Marmalde, marmelosin
<b>Coumarines de dihydrofurane</b>		Anthogenol, Felamidin, Marmesin, rutaretin
<b>Phényl coumarines</b>		Isodispar B, dispartiol B, mammea A/AB, cyclo E, mammea A/AB, dioxalanocyclo F, disparinol D, disparpropylinol B
<b>Bicoumarines</b>		Dicoumarol

<p><b>Pyranocoumarines :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Type de ligne</b></li> <li>• <b>Type Angular</b></li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grandivittin, Agasyllin, Aegelinolbenzoate, Xanthyletin.</li> <li>• Inophyllum A, B, C, E, P, G1, and G2, Inophyllum A, B, C, E, P, G1, and G2.</li> </ul>
--	---	---

### 3.1.1.4. Tanins

Les tanins sont des composés polyphénoliques secondaires couramment présents dans des nombreuses plantes, notamment les légumineuses fourragères., ils sont souvent considérés comme antinutritionnels, En raison de leur capacité à se lier aux protéines, où ils peuvent réduire la digestibilité des protéines à fortes concentrations (> 40–50 g/kg de matière sèche), mais aussi bénéfiques à faibles ou moyennes doses où ils peuvent réduire la digestion des protéines à des concentrations élevées.

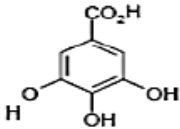
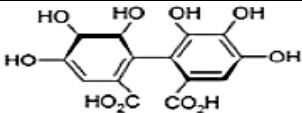
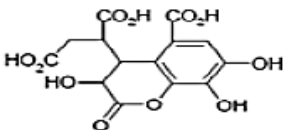
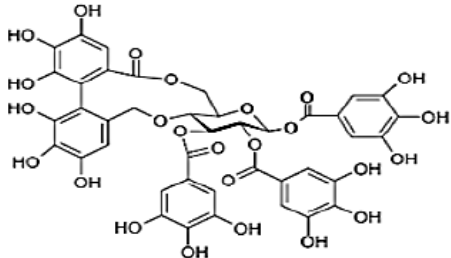
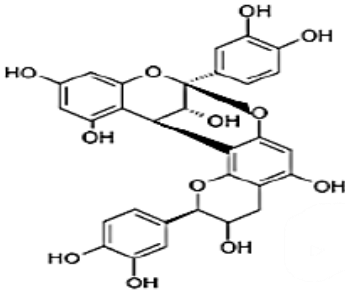
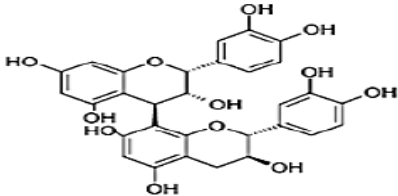
Les tanins jouent un rôle important dans la défense des plantes contre les herbivores, les insectes et les micro-organismes.

- **Classification des tannins**

On distingue principalement deux grandes classes :

- Tanins hydrolysables, dérivés de l'acide gallique,
- Tanins condensés, ou proanthocyanidines, formés par la polymérisation de flavan-3-ols.

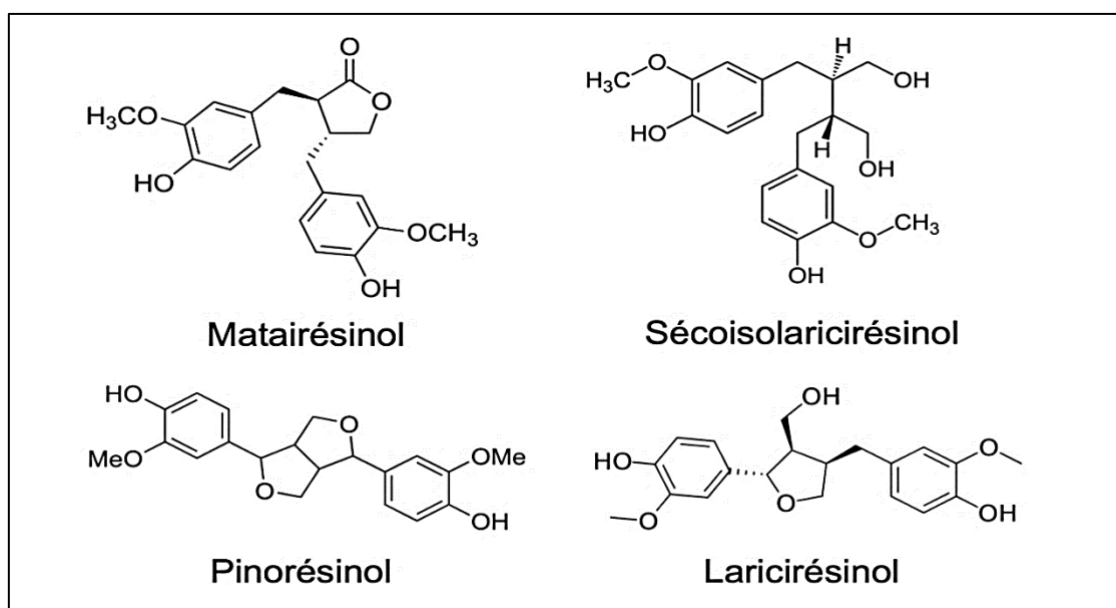
**Tableau 22 : Structures des tanins hydrolysables et condensés (Bruneton, 1999).**

Types de tanins	Sous- Type	Structure des tanins	Exemple
<b>Tanins hydrolysables</b>	Tanins galliques	Composés d'acide gallique ou galloylé, estérifiés avec un sucre (souvent glucose)	
	Tanins ellagiques	Dérivés d'hexahydroxydip hényl (HHDP) liés à un sucre, formant l'acide ellagique après hydrolyse	 
	Tanins mixtes (complexes)	Combinaison de motifs galliques et ellagiques liés à des polyphénols	
<b>Tanins condensés</b>	Type A	Dimères avec double liaison interflavanique : C4→C8 et C2→O→C7	
	Type B	Dimères avec liaison simple interflavanique : C4→C8	



### 3.1.1.5. Lignanes

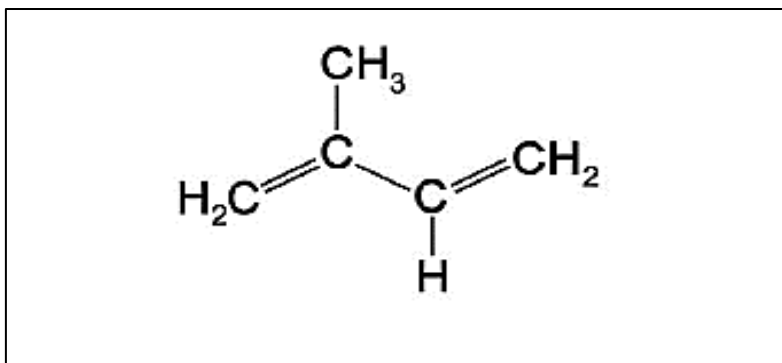
Les lignanes sont des composés polyphénoliques naturels largement présents dans le règne végétal, ils sont formés par la liaison de deux unités phénylpropanoïdes (issues de la phénylalanine) via leur carbone central (C8–C8'). Ils se trouvent couramment chez les plantes supérieures, notamment dans les graines, comme chez le lin, où ils sont riches en sécoisolaricirésinol diglucoside (SDG) et matairesinol. Certains lignanes ont des effets antioxydants, phyto-œstrogéniques, ou encore anticancéreux (**Lamblin *et al.*, 2007**). Les lignanes sont chimiquement similaires des lignines, mais ont des structures bien définies.



**Figure 16 :** Structures des principaux lignanes alimentaires

### 3.2. Terpénoïdes

Les terpénoïdes représentent le groupe le plus important de composés secondaires. Ils sont produits via deux voies de synthèse. La voie principale est celle de l'acide mévalonique et une seconde voie de synthèse implique la 2-C-méthyl-D-érythritol 4-phosphate/1-déoxy-D-xylulose 5-phosphate (MEP). Les terpénoïdes se classent en fonction du nombre d'unités d'isoprène qui les constituent. On distingue donc les monoterpènes, les sesquiterpènes, les diterpènes, les triterpènes et les polyterpènes (**Calatayud *et al.*, 2021**). La plupart des monoterpénoïdes sont des composés volatils responsables d'odeurs de nombreuses espèces végétales (**Calatayud *et al.*, 2021**).



**Figure 17 :** Structure chimique de l'isoprène

### 3.3. Alcaloïdes

Les alcaloïdes sont des molécules organiques hétérocycliques azotées et leur répartition est déterminée spécifiquement selon la classification taxonomique des plantes. Ils sont principalement issus d'acides aminés (phenylalanine, tyrosine, tryptophane, lysine et ornithine). (Calatayud *et al.*, 2021)

Parmi les alcaloïdes, les monoterpénoïdes indoliques représentent une classe particulièrement vaste, ils résultent de la combinaison entre une partie azotée qui provenant d'un acide amine tryptophane et une partie terpénique, Leur synthèse passe par des réactions de décarboxylation, de condensation aldol, d'amination réductive ou de méthylation. (De Luca et St Pierre, 2000)

#### • Classification des alcaloïde

Il existe six classes d'alcaloïdes :

- Les benzyl isoquinolines (comme la morphine)
- Les tropanes caractéristiques des Solanacées (comme la cocaïne)
- Les indoles (comme la strychnine)
- Les pyrrolizidines (comme la sénécionine)
- Les quinolizidines (comme la quinoléique)
- Les purines (comme la caféine)

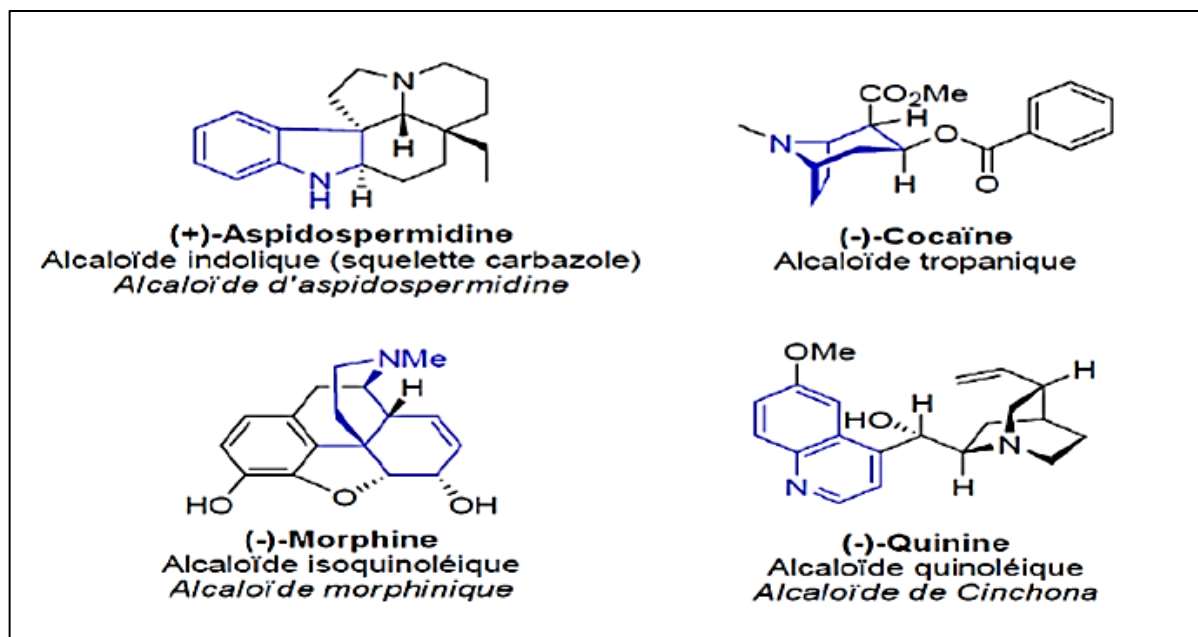


Figure 18 : Exemples d'alcaloïdes hétérocycliques

#### 4. Activités biologiques des métabolismes secondaires

Les métabolites secondaires ont une importance fondamentale dans les interactions entre les plantes avec leur environnement, aussi à la sphère biomédicale. En effet, ces composés naturels possèdent une variété d'activités biologiques favorables à la santé humaine. Le présent travail analyse des graines de lin (*Linum usitatissimum*), de courge (*Cucurbita pepo*), de chia (*Salvia hispanica*) et de fenouil (*Foeniculum vulgare*), connues pour leur richesse en composés phénoliques, flavonoïdes, lignanes, terpénoïdes et acides gras bioactifs.

**Tableau 23** : Les Activités biologique des métabolismes secondaire des quatre espaces.

Espace	Métabolismes secondaires	Activités biologiques principales	Références
<b><i>Linum usitatissimum</i></b>	- Lignanes (SDG) - Acides phénoliques - Oméga-3 (ALA)	- Antioxydante - Anti-inflammatoire - Anticancéreuse – Anti-obésité potentiel- Hypoglycémiante- Antihypertensive- Cardioprotectrice- Neuroprotectrice	(Stevenson <i>et al.</i> , 2007)
<b><i>Cucurbita pepo</i></b>	- Cucurbitacines - Stérols végétaux - Tocophérols (vitamine E)	- Antimicrobienne - Anti-inflammatoire - Antioxydante - Antidiabétique - Prostate-protectrice	(Batoool <i>et al.</i> , 2022) (Tripathi <i>et al.</i> , 2023), (Ratnam <i>et al.</i> , 2017)
<b><i>Salvia hispanica</i></b>	- Acides phénoliques - Flavonoïdes - Oméga-3 - Fibres solubles	- Antioxydante - Hypolipidémiante - Anti-inflammatoire - Neuroprotectrice - Régulatrice du transit - Anti fongique	(Hernández-Pérez <i>et al.</i> , 2020), (spaio <i>et al.</i> 2012) (Ayerza <i>et Coates</i> , 2004)
<b><i>Foeniculum vulgare</i></b>	- Flavonoïdes - Huiles essentielles (anéthol, fenchone) - Coumarines	Antibactérienne -anti fongique - Anti- inflammatoire - Hépatoprotectrice- antioxydante- antithrombotique- antidiabétique	(Badgujar <i>et al.</i> , 2014)

# **Partie II :**

## **Matériel et Méthodes**

### Matériel et Méthodes

#### 1. Matière biologique

Dans cette recherche, nous avons utilisé des graines provenant de quatre espèces végétales médicinales et nutritives bien connues : le lin (*Linum usitatissimum*), la courge (*Cucurbita pepo*), le chia (*Salvia hispanica*) et le fenouil (*Foeniculum vulgare*).

Les graines ont été choisies en raison de leur forte teneur en métabolites secondaires (les acides gras, lignanes, flavonoïdes et composés phénoliques), ainsi que pour leurs caractéristiques biologiques attestées (antioxydantes, anti-inflammatoires, antimicrobiennes, etc.). Les graines utilisées ont été achetées sur un marché public à-situer dans la commune de Constantine.



**Figure 19 :** Graines utilisées pour l'étude

A) (*Linum usitatissimum*), B) (*Foeniculum vulgare*), C) (*Salvia hispanica*), D) (*Cucurbita pepo*).

### 1.1. Méthode d'extraction des huiles et des composés bioactifs

Dans le cadre de cette étude, deux types d'échantillons ont été préparés pour l'évaluation comparative des activités biologiques :

- Les huiles pressées à froid issues des graines sélectionnées
- Les extraits méthanoliques préparés à partir des graines broyées.

#### 1.1.1. Extraction des huiles par pression à froid

Les huiles de lin (*Linum usitatissimum*), de courge (*Cucurbita pepo*), de chia (*Salvia hispanica*) et de fenouil (*Foeniculum vulgare*) ont été extraites par pression à froid. Cette méthode mécanique n'utilise ni chaleur intense ni solvant organique, ce qui permet la conservation des composés sensibles à la chaleur comme les acides gras polyinsaturés, les antioxydants, les vitamines liposolubles et les composants volatils naturels (Petrooulos *et al.*, 2021). Dans cette approche, on se limite à l'utilisation de techniques de pressage mécanique et de filtration, ce qui aboutit à une huile extra vierge, pure et non raffinée, dotée d'une qualité nutritionnelle et sensorielle supérieure. Malgré un rendement d'extraction assez modeste (approximativement 30 %, variant légèrement selon la graine), ce processus assure une préservation optimale des oligo-éléments, des omégas 3 et 6, des tocophérols ainsi que des composés phénoliques (Malcolmson, 2015 ; Stevenson *et al.*, 2007 ; Grancieri *et al.*, 2019).





Figure 20 : machine d'extraction des huiles à partir des graines.

#### 1.1.2. Préparation des extraits méthanoïques des graines

- Les graines de lin (*linum usitatissimum*), citrouille (*cucurbita pepo*), chia (*salvia hispanica*) et fenouil (*foeniculum vulgaret*), chaque graines 20 mg.



Figure 21 : Les graines de (*Linum usitatissimum*), (*Cucurbita pepo*), (*Salvia hispanica*) et de (*Foeniculum vulgaret*).



- À l'aide d'un mortier et d'un pilon, chaque type de graine ont été broyées et écrasés jusqu'à l'obtention d'une poudre presque homogène.



**Figure 22 :** Broyage des graines

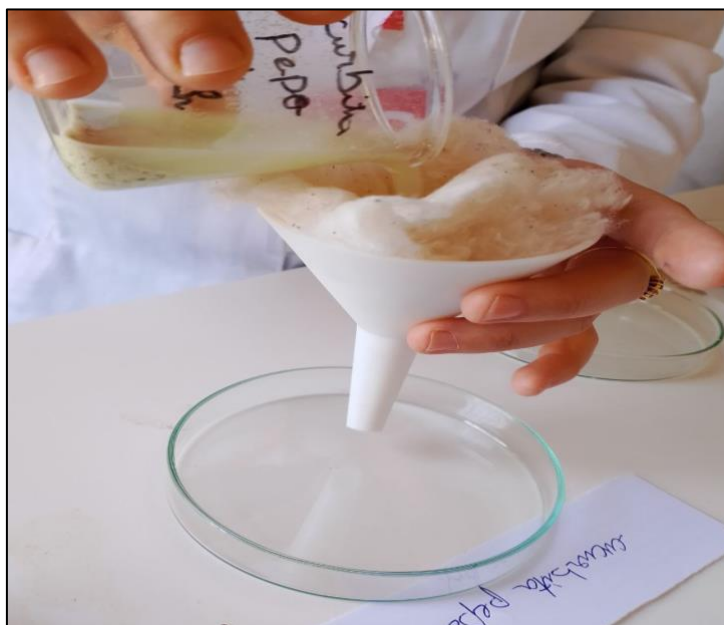
A) (*Linum usitatissimum*), B) (*Foeniculum vulgare*).

- On met la poudre qui a déjà obtenue dans un bécher, puis on ajoute le méthanol (jusqu'à immersion complète) afin d'extraire les composés bioactifs. L'extraction s'est déroulée par macération statique pendant 4 heures à température ambiante, dans la paillasse.



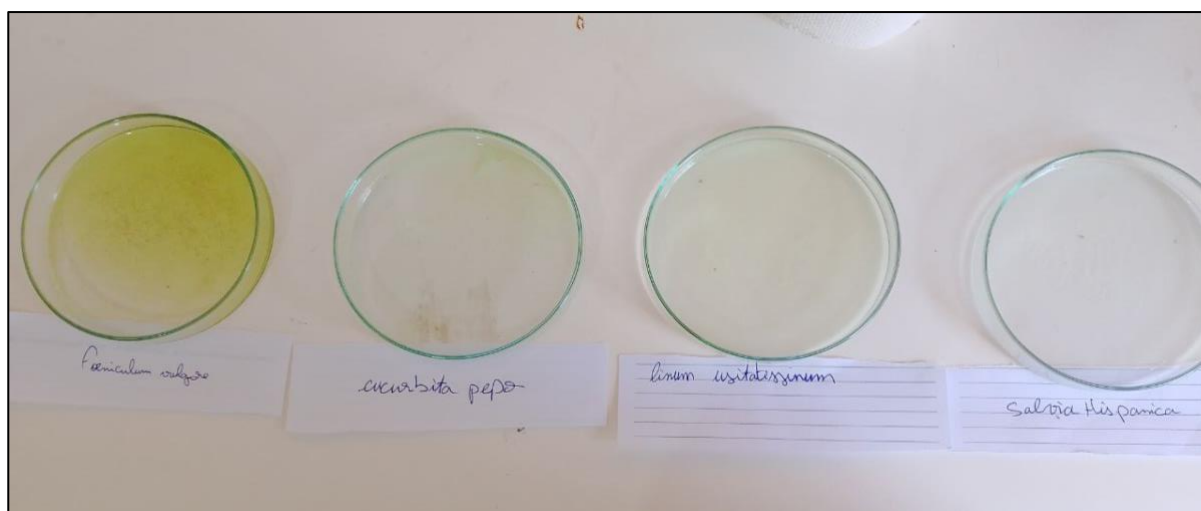
**Figure 23 :** Macération des graines dans le méthanol.

- Après macération, le mélange a été filtré à l'aide de coton cardé pour séparer la phase liquide de la matière végétale résiduelle.



**Figure24 :** Filtration des extraits méthanoliques par un coton cardé.

- On transféré les solutions filtrées dans des boîtes de Petri en verre dans un endroit sombre et les laisser à l'air libre jusqu'à évaporation complète du solvant.

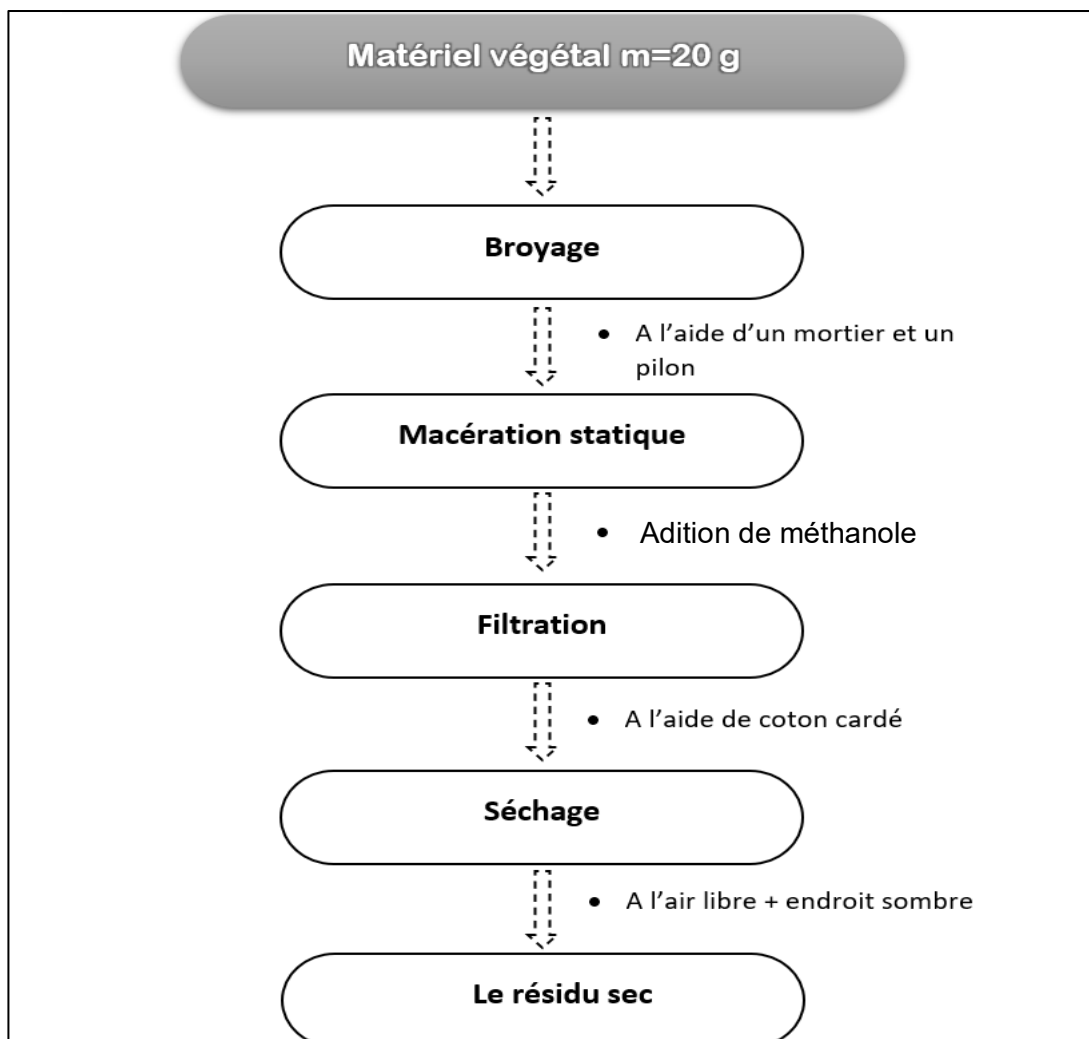


**Figure 25 :** Les filtrats des solutions des quatre graines.

- Après l'évaporation complète du solvant, on obtient des résidus secs.



**Figure 26 :** Extrait méthanolique de *salvia hispanica*.



**Figure 27 :** schéma des étapes de préparation des extraits méthanoliques des graines

### 2. Quantification de certains métabolites secondaires

L'étude de détermination du total en composés phénoliques des quatre graines (les huiles et les extraits) a été réalisée pour la quantification du taux des flavonoïdes et des polyphénols.

#### 2.1. Dosage des polyphénols totaux (TP)

- **Principe**

La teneur en polyphénols totaux a été déterminée selon la méthode décrite par **Singleton et Rossi (1965)**, avec une adaptation à la lecture en de microplaque selon le protocole de **Muller et al.**, (2010). Le réactif Folin-Ciocalteu (FCR), constitué par un mélange d'acide phosphotungstique et d'acide phosphomolybdique est réduit lors de l'oxydation des phénols en mélange d'oxyde de tungstène et molybdène ; la coloration bleu produite est proportionnelle à la teneur en polyphénols totaux présents dans l'échantillon et possède une absorbance maximum aux environ de 750-765 nm.

- **Mode opératoire**

Un volume de 20 µl d'extrait de plante (1 mg d'extrait dissout dans 1 ml de méthanol) est ajouté à 100 µl de FCR dilué (1 :10). Ensuite un volume de 75 µl de carbonate de sodium (7,5%) est additionné. Le mélange est laissé à l'obscurité pendant 2 heures à température ambiante. L'absorbance de différentes intensités de la couleur bleue résultante est déterminée à 765 nm. Un blanc est préparé de la même manière en remplaçant l'extrait par le solvant utilisé (Méthanol). L'acide gallique est utilisé comme contrôle positif, à partir de lequel une courbe d'étalonnage a été établie.

### 2.2. Dosage des flavonoïdes totaux (TF)

- **Principe**

La quantification des flavonoïdes totaux dans les extraits a été réalisée selon la méthode décrite par **Topçu *et al.*, (2007)**, avec quelques modifications permettant l'adaptation à une lecture de microplaque 96 puits de volume 250 µl pour chaque puits.

Cette méthode repose sur la formation d'un complexe coloré entre les ions aluminium ( $Al^{3+}$ ) et les groupes hydroxyles des flavonoïdes présents dans les extraits. La réaction produit un complexe flavonoïde-aluminium de couleur jaune, dont l'intensité est proportionnelle à la teneur en flavonoïdes. La lecture ça s'effectue à 630 nm.

- **Mode opératoire**

Un volume de 50 µl de l'extrait est mélangé avec : 130 µl de méthanol, 10 µl d'acétate de potassium et 10 µl de nitrate d'aluminium. Le mélange est ensuite maintenu à la température ambiante pendant 40 min puis une lecture d'absorbance est réalisée à 415 nm. La quercétine est utilisée comme contrôle positif, à partir duquel une courbe d'étalonnage a été établie.

### 3. Evaluation de l'activité biologique

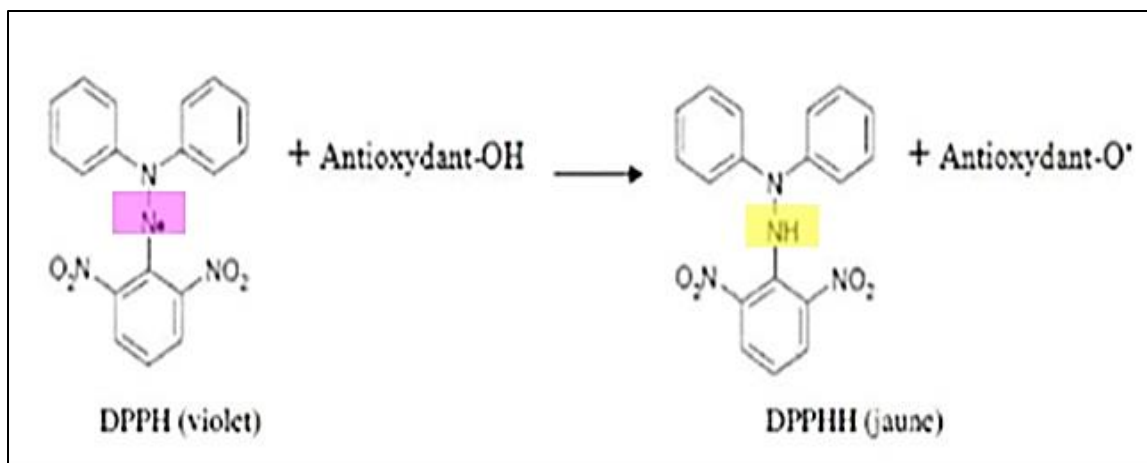
#### 3.1. Evaluation d'activité antioxydante *in vitro*

L'étude de l'activité antioxydante des quatre graines (les huiles et les extraits) a été testée selon deux méthodes : piégeage du radical libre DPPH et pouvoir réducteur (FRAP).

##### 3.1.1. Test de piégeage du DPPH

- **Principe**

L'activité anti-radicalaire libre est déterminée par spectrophotométrie par le dosage du DPPH (hydrate de 2-diphényl-2-picrylhydrazyle) (**Blois, 1958**). Le radical DPPH est un radical libre stable de couleur violette. Lorsqu'un antioxydant est présent, Le DPPH réduit devient incolore ou jaune pâle.



**Figure 28 :** Réaction antioxydant par le radical DPPH (Salim *et al.*, 2020).

- **Mode opératoire :**

- **Préparation de DPPH :**

Le protocole consiste à dissoudre 6mg de DPPH dans un volume de 100mg de méthanol, le radical DPPH est dissous dans le méthanol et garde à -20 °C à l'abri de la lumière. L'absorbance est 0,5 à 517 nm.

- **Procédure de travail :**

40 µL de l'échantillon à différentes concentrations, ont été ajoutés à 160 µL de DPPH, après une incubation de 30 min à température ambiante et à l'obscurité. La lecture se fait à une longueur d'onde de 517 nm à l'aide d'un lecteur de microplaque. À partir de l'équation suivante, le pourcentage d'activité antioxydante a été déterminé en mesurant le pourcentage d'inhibition (I %) des radicaux DPPH.

$$\text{DPPH (\%)} = [(A_{\text{contrôle}} - A_{\text{échantillon}}) / A_{\text{contrôle}}] \times 100.$$

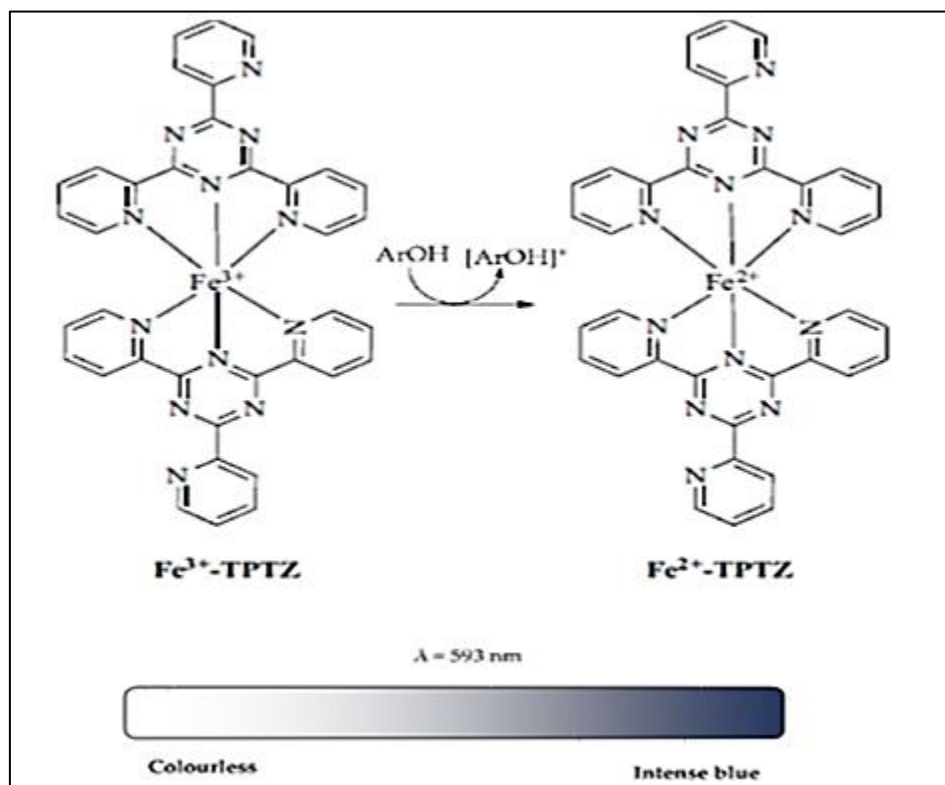
-A *contrôle* : activité anti oxydante de contrôle

-A *échantillon* : activité anti oxydante d'échantillon

### 3.1.2. Test pouvoir réducteur de fer (FRAP)

- **Principe**

La capacité de réduction ferrique est déterminée par la méthode de **Oyaizu (1986)** avec une légère modification. L'activité antioxydante basée sur la réduction du  $\text{Fe}^{3+}$  présent dans le Complexe ferricyanure de potassium ( $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ ) en  $\text{Fe}^{2+}$ .



**Figure 29** : Réaction du pouvoir antioxydant réducteur ferrique (**Munteanu et Apetrei, 2021**).

- **Mode opératoire**

10  $\mu\text{L}$  de l'extrait, préparé à différentes concentrations, a été mélangé à 40  $\mu\text{L}$  d'une solution tampon phosphate 0,2 M (pH 6,6) et 50  $\mu\text{L}$  de ferricyanure de potassium ( $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ ) à 1% (1 g de  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$  dans 100 ml  $\text{H}_2\text{O}$ ). Le mélange a été incubé à 50 °C pendant 20 minutes. Après incubation, ajouter 50  $\mu\text{L}$  d'acide trichloroacétique (TCA) à 10%, 40  $\mu\text{L}$  d'eau distillée, et 10  $\mu\text{L}$  de chlorure ferrique ( $\text{FeCl}_3$ ) à 0,1% (1 g de TCA dans 10 ml  $\text{H}_2\text{O}$ ). La lecture de l'absorbance du milieu réactionnel se fait à une longueur d'onde de 700 nm. Il y a une relation directe entre l'augmentation de l'absorbance et l'augmentation du pouvoir réducteur des échantillons.



### 3.2.Évaluation des activités enzymatiques *in vitro*

L'étude de l'activité enzymatique des quatre graines (les huiles et les extraits) a été testée selon une deux méthodes : activités  $\alpha$ -amylase et activité anticholinestérase

#### 3.2.1. Test d'inhibition de l'acétylcholinestérase

- **Principe**

L'activité inhibiteurs de l'acétylcholinestérase et de la butyrylcholinestérase est basée sur la réaction entre la thiocholine (produit de l'hydrolyse de l'acétylthiocholine) et le DTNB (5,5'-dithiobis-(2-nitrobenzoïque acide), c'est une méthode colorimétrique déterminée par la méthode de **Ellman *et al.*, (1961)**.

- **Mode opératoire**

10  $\mu$ L d'extrait solution dissous dans l'éthanol a différentes concentrations dans 150  $\mu$ L de tampon sodium phosphate buffer a 100 mM (pH 8.0) ajouter 20  $\mu$ L de solution AChE ( $5.32 \pm 10^{-3}$  U) ou BChE ( $6.85 \pm 10^{-3}$  U) après incubé a 25°C pendant 15 mn rajouter 10  $\mu$ L de DTNB (0.5 mM) et 10  $\mu$ L d'iodure d acetylthiocholine (0.71 mM) ou 10  $\mu$ L de chlorure de butyrylthiocholine (0.2 mM). La lecture à 412 nm, pour 0 mn une fois lecture, 5 mn deux lecture, 10 mn trois lecture, 15 mn quatre lecture.

Le pourcentage d'inhibition d'enzyme AChE ou BChE est déterminé par rapport au blanc (éthanol avec le phosphate buffer pH= 8) par la formule suivante :

$$\text{Inhibition (\%)} = [(EE - S) / E] \times 100$$

E : l'activité de l'enzyme sans extrait

S : l'activité de l'enzyme avec l'extrait

Le Galantamine est utilisé comme référence.



### **3.2.2. Test d'inhibition de l'alpha-amylase ( $\alpha$ -amylase)**

- **Principe**

L'activité inhibitrice de l' $\alpha$ -amylase a été évaluée selon la méthode à l'iode/iodure de potassium (IKI), décrite par **Zengin *et al.*, (2014)** avec quelques modifications. Cette méthode repose sur la capacité de l'enzyme à hydrolyser l'amidon en sucres réducteurs. Après incubation, la quantité d'amidon non hydrolysé est révélée par l'ajout du réactif IKI, qui réagit spécifiquement avec l'amidon pour former un complexe bleu.

- **Mode opératoire**

25  $\mu$ L de l'extrait, préparé à différentes concentrations, a été mélangé à 50  $\mu$ L d'une solution  $\alpha$  amylase 1U. après, incubation pendant 10 min à 37 °C, ajouter 50  $\mu$ l d'amidon 0.1%. Le mélange a été incubé à 37°C pendant 10 minutes. Après incubation, ajouter 25 $\mu$ l Le chlorure d'hydrogène (HCl) à 1M et 100 $\mu$ l de l'iode/iodure de potassium (IKI). La lecture de l'absorbance se fait à une longueur d'onde de 630 nm par un lecteur de microplaque (chaque plaque à 96 puits de volume 250  $\mu$ l pour chaque puits).

Le Calcul de pourcentage d'inhibition se fait par l'équation suivante :

$$\%INH=1-[(A_c-A_e)-(A_s-A_b)/(A_c-A_e)].$$

$A_c$ =Absorbance [Amidon+IKI+HCl+Vol de solvant d'extrait+Vol tampon Enzyme].

$A_e$ =Absorbance [Enzyme+Amidon+IKI+HCL+ Vol de solvant d'extrait].

$A_s$ =Absorbance [Enzyme+Extrait+Amidon+IKI+HCl].

$A_b$ =Absorbance [Extrait+IKI+125 $\mu$ l de tampon].

### 3.3. Test de photoprotection in vitro (SPF)

- **Principe**

Le test photoprotecteur (SPF) est une méthode utilisée pour évaluer la capacité d'un produit ou d'un extrait (souvent végétal ou huileux) à protéger la peau contre les rayons ultraviolets (UV), notamment les UVB (280–320 nm), qui sont responsables des coups de soleil et de certains types de cancers cutanés, ce test est réalisé selon la méthode de **Mansur *et al.*, (1986)**.

- **Mode opératoire**

Pour les extraits : 2 mg dans 1 ml d'éthanol (EtOH).

Montre 1,0 g de l'échantillon (huile, extrait) dans un ballon jaugé de 100 ml et dilué au volume avec de l'éthanol (produit de Merck, catégorie analytique), ensuite la solution est mise dans un bain en ultrason pendant 5 minutes et suivi par filtration à l'aide du coton en jetons les dix premiers volumes. Une partie aliquote de 10 ml est transférée dans un ballon jaugé de 100 ml et diluée au volume avec de l'éthanol. A la fin une partie aliquote de 10 ml est transférée dans un ballon jaugé de 50 ml et le volume accomplis par de l'éthanol.

### 3.4. Activité antifongique des plantes d'intérêts

L'activité antifongique a été évaluée par la méthode de contact direct sur le disque de mycélium pour déterminer les taux d'inhibition.

#### 3.4.1. Matière fongique

La souche fongique utilisée pour tester l'activité antifongique des huiles et extraits de graines est un champignon filamenteux microscopique appartenant au genre *Fusarium*, largement reconnu pour son pouvoir phytopathogène.

Ce champignon est responsable de nombreuses maladies des plantes et de contaminations des denrées alimentaires, notamment les céréales, par la production de mycotoxines (Summerell *et al.*, 2003). Les isolats sont entretenus par un repiquage bimestriel sur milieu PDA incliné et les milieux ensemencés sont incubés à 28 C° pendant 5 à 7 jours puis conservés à 4 C° afin de garder la viabilité de la souche. La figure ci-dessus présente l'espèce *Fusarium sp.* (Figure 30)

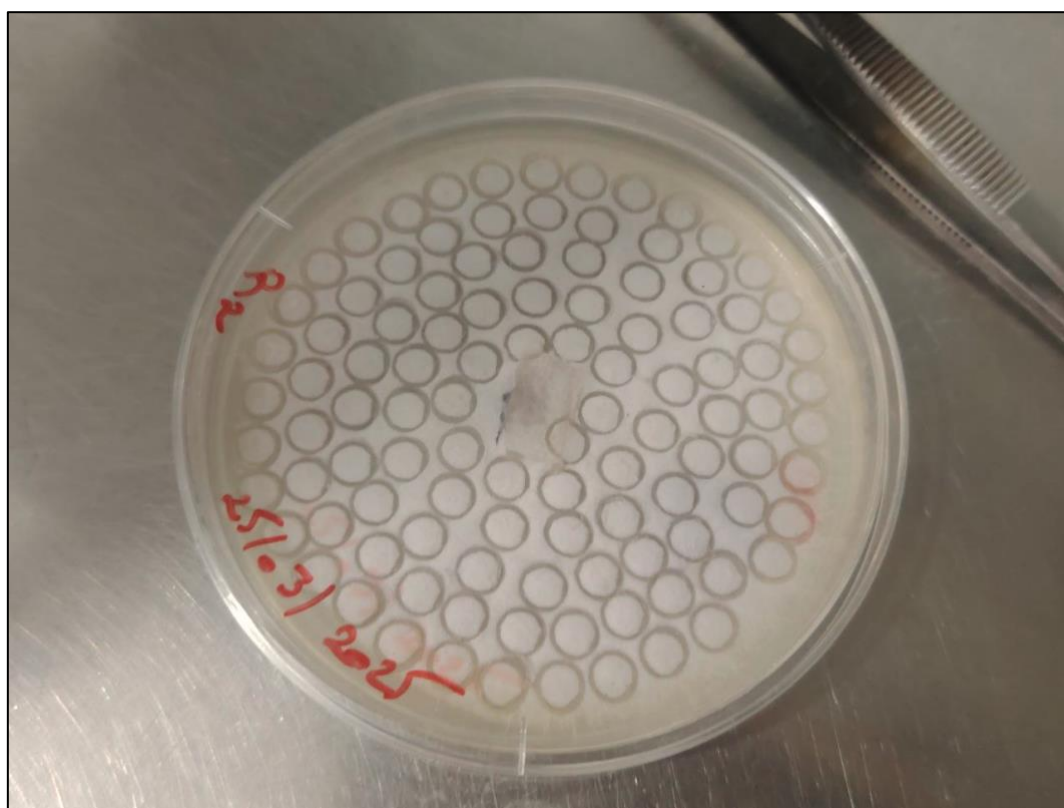
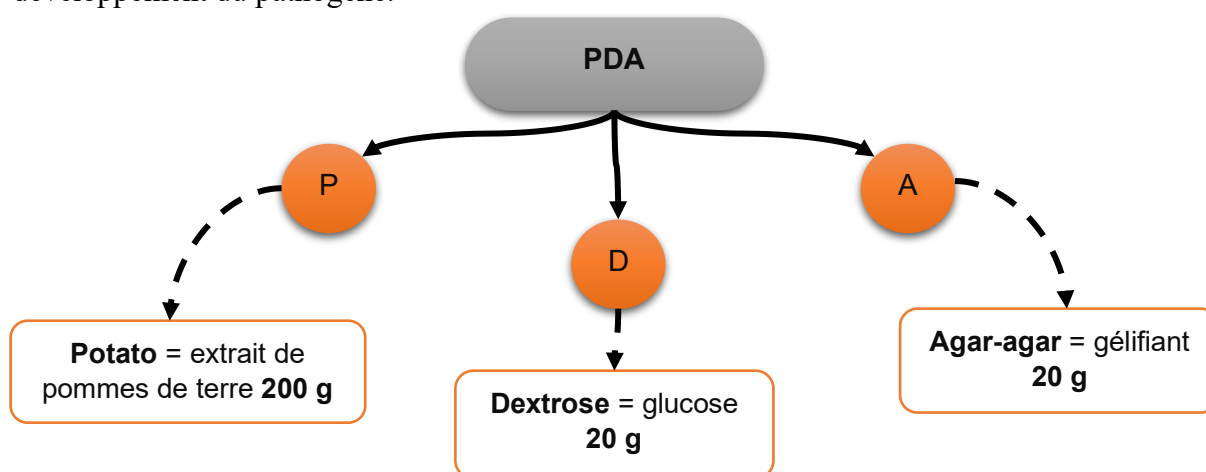


Figure 30 : La souche fongique *fusarium sp.*

La méthode réalisée dans cette étude pour la détermination de l'activité antifongique est la méthode des disques mycéliens.

### 3.4.2. Choix du milieu de culture

Le milieu de culture PDA (Potato Dextrose Agar) est utilisé tout au long de l'étude pour l'obtention de cultures en boîtes de Pétri. Ce milieu a été utilisé pour l'étude de la croissance mycélienne. Le choix de ce milieu de culture est basé sur son adéquation pour un bon développement du pathogène.



**Figure 31 :** Schéma de la composition du milieu de culture PDA

### 3.4.3. Préparation de milieu de culture (PDA)

- **Protocole**

Le milieu PDA (Potato Dextrose Agar) a été préparé selon la méthode classique. Pour cela, 200 g de pommes de terre ont été bouillies dans 1 L d'eau distillée pendant 20 minutes.

Le bouillon obtenu a été filtré à chaud à l'aide d'une mousseline, puis le volume du filtrat a été ajusté à 1000 ml avec de l'eau distillée. Ensuite, 20 g de glucose et 20 g d'agar-agar ont été ajoutés. Le mélange a été chauffé jusqu'à dissolution complète des composants. La préparation a ensuite été répartie dans des flacons ou des tubes, puis stérilisée à l'autoclave à 121 °C pendant 20 minutes. Enfin, après refroidissement à une température d'environ 45–50 °C, le milieu a été coulé dans des boîtes de Petri stériles, à raison de 20-25 ml par boîte.

### 3.4.4. Méthode des disques mycéliens

Après solidification du milieu PDA, un volume de 50  $\mu$ L de l'extrait est déposé directement sur la surface du disque mycélien (6 mm) placé au centre d'une boîte de Pétri. Une boîte de PDA avec un disque de mycélium servi de témoins. Les boîtes sont incubées 48 h à 37°C.



**Figure 32 :** Dépôt central du disque mycélien sur gélose PDA.

### 3.4.5. Application des huiles et extraits

La procédure consiste à :

- Déposer les disques de mycélium au centre des boîtes de pétri (selon la méthode des disques mycéliens).
- Déposer 50  $\mu$ L d'huile ou d'extrait sur la surface du disque de mycélium, au centre de la boîte (**Annexe 1**).
- Réaliser 3 répétitions (3 boîtes) pour chaque huile ou extrait testé.
- Prévoir un témoin négatif : disque de mycélium sans traitement.
- Prévoir un témoin positif : disque de mycélium sans traitement + diméthylsulfoxyde (DMSO) (seulement pour les extraits).
- Fermer les boîtes avec du papier film ou du ruban de laboratoire.
- Incuber les boîtes pendant 48 heures dans une étuve à température de 37°C.

### ❖ Analyse statistique

Les résultats des tests réalisés sont présentés sous forme de moyennes  $\pm$  écart-type (SD) à partir de trois essais. Les valeurs de la CI50 (Concentration inhibitrice à 50%) et de A0,50 (concentration correspondant à une absorbance de 0,50) sont déterminées par la méthode de régression linéaire à partir de deux courbes : [% inhibition = f(concentrations)] pour la CI50 et [Absorbance = f(concentrations)] pour la A0,50. Les comparaisons multiples et la détermination des niveaux de signification sont effectuées à l'aide du test DSH de Tukey (différence significative honnête) et du test ANOVA univarié. Les différences sont considérées comme statistiquement significatives pour une valeur de  $p < 0,05$ .

# **Partie III :**

## **Résultats et Discussion**

## 1. Quantification de certains métabolites secondaires

La quantification des métabolites de *Foeniculum vulgare*, *Linum usitatissimum*, *Cucurbita pepo*, et *Salvia hispanica* a été faite par deux dosages (TP et TF).

Les résultats obtenus des différents dosages sont exprimés en  $\mu\text{g}$  équivalent d'acide gallique par mg d'extrait ( $\mu\text{g eq AG/mg E}$ ) pour le total phénolique par mg d'extrait, et en  $\mu\text{g}$  équivalent de quercétine par mg d'extrait ( $\mu\text{g eq Qrc/mg E}$ ) pour les flavonoïdes par mg d'extrait (**Tableau 24**), en utilisant les équations de la régression linéaire des courbes d'étalonnage (**Figures 34, Figure 37**).

**Tableau 24 :** Teneur en polyphénols et en flavonoïdes totaux des extraits et des huiles des CH, L, CT, F.

	TP ( $\mu\text{g eq AG/ mgE}$ )	TF ( $\mu\text{g eq Qrc/ mgE}$ )
<b>HCH</b>	13,79 $\pm$ 0,55 <sup>c</sup>	50,71 $\pm$ 1,63 <sup>b,c</sup>
<b>HL</b>	13,69 $\pm$ 0,9 <sup>c</sup>	49,01 $\pm$ 2,66 <sup>c</sup>
<b>HCT</b>	1,05 $\pm$ 0,05 <sup>d</sup>	51,91 $\pm$ 0,60 <sup>b,c</sup>
<b>HF</b>	0,52 $\pm$ 0,05 <sup>d</sup>	36,25 2,43 <sup>d</sup>
<b>ECH</b>	13,52 $\pm$ 0,92 <sup>c</sup>	52,41 $\pm$ 1,67 <sup>b,c</sup>
<b>EL</b>	2,52 $\pm$ 0,35 <sup>d</sup>	46,56 $\pm$ 1,88 <sup>c</sup>
<b>ECT</b>	15,99 $\pm$ 1,3 <sup>b</sup>	55,37 $\pm$ 1,62 <sup>b</sup>
<b>EF</b>	25,92 $\pm$ 0,40 <sup>a</sup>	72,16 $\pm$ 0,78 <sup>a</sup>

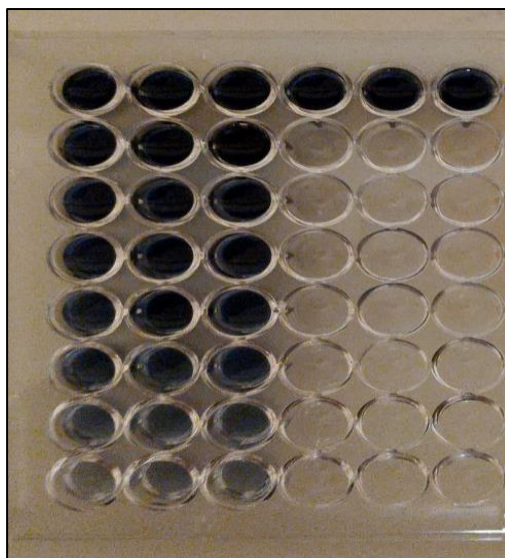
TP : Total phénolique, TF : Total flavonoïde,

HCH : Huile des graines de Chia ; HL : Huile des graines de Lin ; HCT : Huile des graines de citrouille ; HF : Huile des graines de fenouil ; ECH : Extrait des graines de Chia ; EL : Extrait des graines de Lin ; ECT : Extrait des graines de Citrouille ; EF : Extrait des graines de Fenouil.

Les valeurs TP et TF sont exprimées sous forme de moyenne  $\pm$  écart type ( $n = 3$ ). Les valeurs portant des lettres différentes (a, b, c, d) sont significativement différentes ( $p < 0,05$ ).

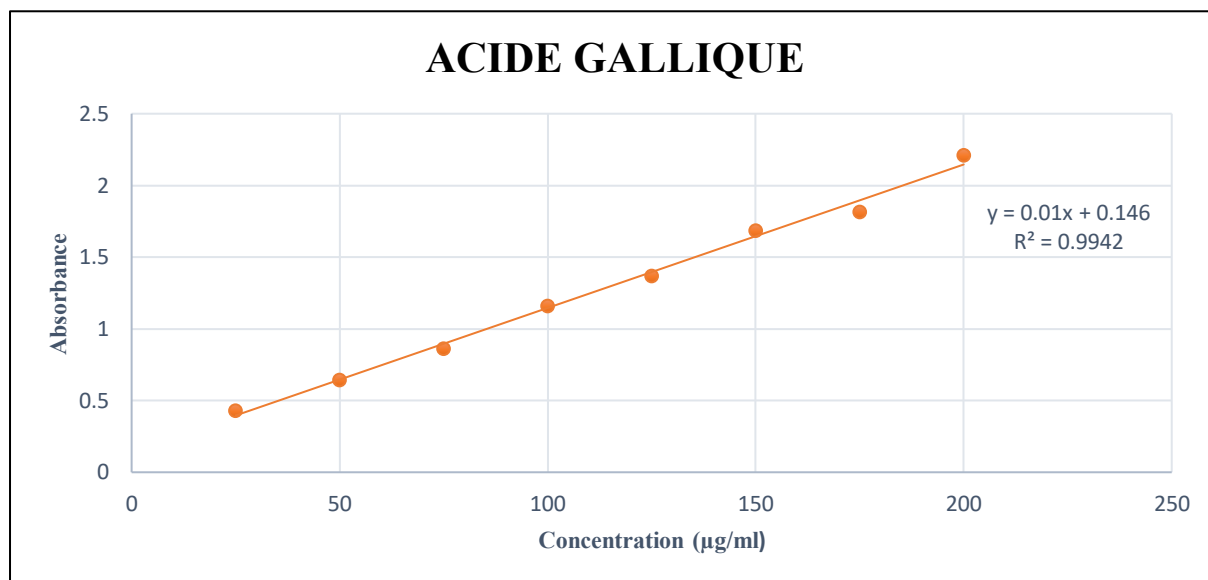


Le dosage des polyphénols totaux dans les extraits et les huiles a été réalisé par la méthode spectrophotométrique de Folin-ciocalteu (FCR). Les résultats sont présentés dans la **figure 33**.



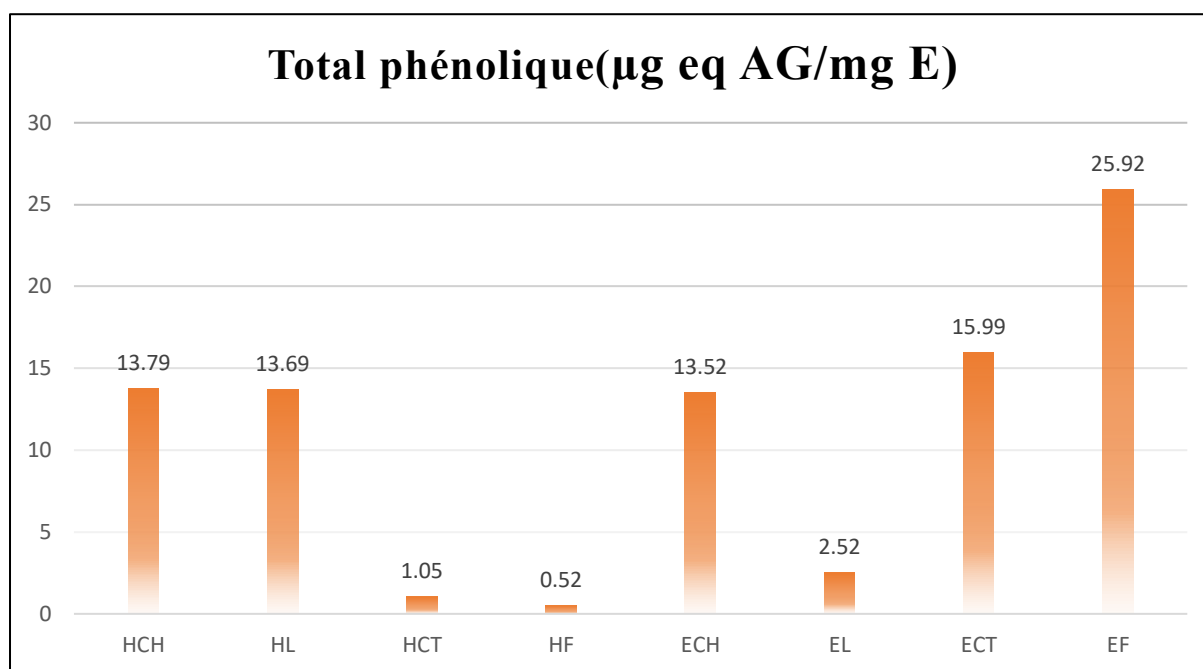
**Figure 33 :** La plaque de dosage des polyphénols des plantes d'intérêts.

La teneur en polyphénols totaux est exprimée en  $\mu\text{g}$  équivalent d'acide gallique par mg d'extrait ou d'huile, en utilisant l'équation de la régression linéaire de la courbe d'étalonnage tracée par l'acide gallique ( $y = 0,01x + 0,146$ ) avec  $R^2 = 0,9942$  (**Figure 34**).



**Figure 34 :** Courbe d'étalonnage de l'acide gallique.

Les résultats du dosage sont illustrés dans la **figure 35**.



**Figure 35 :** Evaluation des polyphénols totaux des extraits et des huiles des CH, L, CT, F.

L'intégration de composés antioxydants naturels dans l'alimentation constitue aujourd'hui une approche largement encouragée pour prévenir les effets délétères du stress oxydatif. Les graines oléagineuses telles que celles de chia, courge, lin et fenouil se distinguent par leur richesse en polyphénols et flavonoïdes, des molécules bioactives connues pour leur capacité à neutraliser les radicaux libres (Ixtaina *et al.*, 2011 ; Kajla *et al.*, 2015 ; Nwozo *et al.*, 2015 ; Rather *et al.*, 2016).

En plus de leurs bienfaits nutritionnels, ces graines offrent un fort potentiel en tant qu'agents protecteurs contre le vieillissement cellulaire et diverses maladies dégénératives, ce qui en fait des candidates idéales pour le développement de produits fonctionnels et nutraceutiques (Kajla *et al.*, 2015).

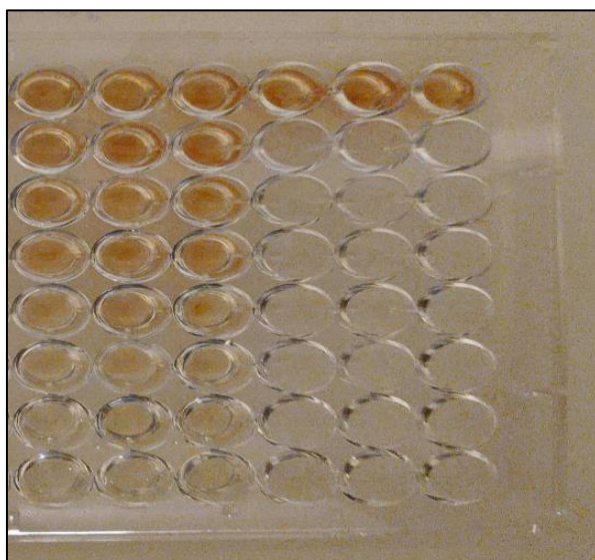
Les résultats présentés dans le **tableau 24** montrent une variation significative de la teneur en polyphénols totaux selon le type de graine et la nature de l'extrait (huile ou extrait méthanolique).

Le plus haut taux de polyphénols a été observé dans l'extrait méthanolique de fenouil (EF) avec une valeur de  $25,92 \pm 0,40 \mu\text{g eq AG/mgE}$ , ce qui traduit une richesse en composés phénoliques hydrosolubles dans cette graine, comme le suggèrent également les travaux de Kaur *et al.*, (2009).

Le ECT et le ECH présentent également des teneurs élevées en polyphénols, respectivement  $15,99 \pm 1,3$  et  $13,52 \pm 0,92$   $\mu\text{g eq AG/mgE}$ , tandis que le EL montre une concentration plus faible ( $2,52 \pm 0,35$   $\mu\text{g eq AG/mgE}$ ). D'autre part, les huiles, en particulier le HCT) et le HF, présentent des concentrations très faibles ( $1,05 \pm 0,05$  et  $0,52 \pm 0,05$   $\mu\text{g eq AG/mgE}$ ) respectivement, ce qui est attendu étant donné la faible solubilité des composés phénoliques dans les milieux huileux, comme le confirment également les travaux de **Khan *et al.*, (2011)**.

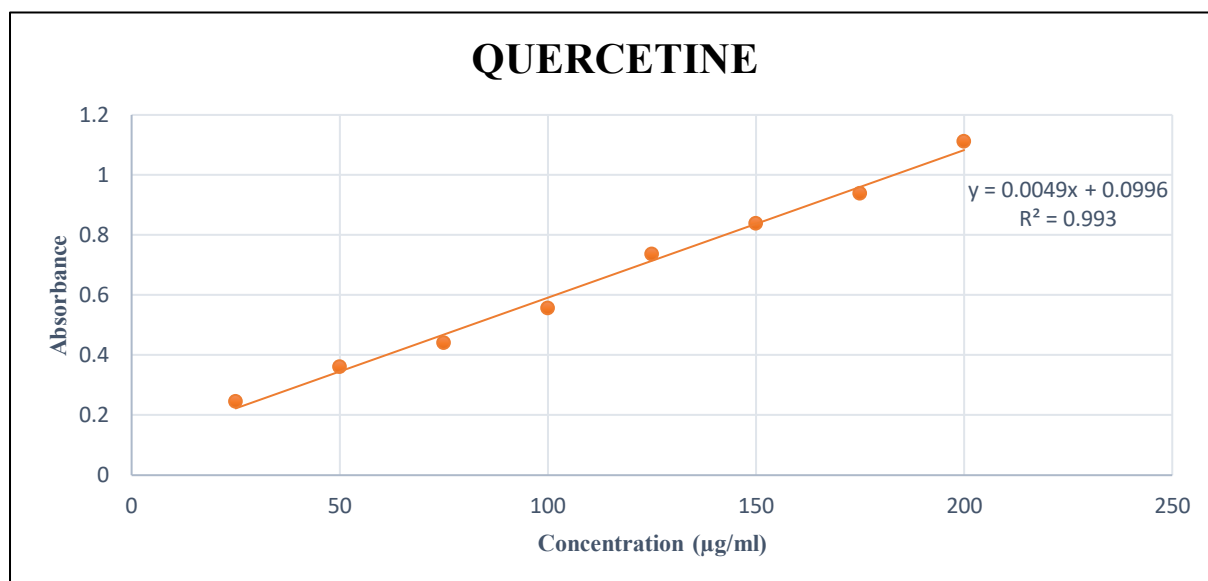
Le HCH et le HL affichent quant à elles des valeurs modérées et relativement proches ( $13,79 \pm 0,55$  et  $13,69 \pm 0,9$   $\mu\text{g eq AG/mgE}$ ) respectivement, Ceci indique la présence de polyphénols lipophiles ou une certaine efficacité d'extraction liée à la méthode d'obtention de l'huile. Ces différences peuvent être expliquées par la polarité du solvant, la nature chimique des composés phénoliques, la structure cellulaire des graines ainsi que les conditions d'extraction (temps, température, rapport solvant/matière) (**Dai *et Mumper.*, 2010**).

La détermination quantitative des flavonoïdes est réalisée par la méthode de trichlorure d'aluminium, elle est basée sur la formation d'un complexe flavonoïde-ion d'aluminium ayant une absorbance maximale à 430 nm. Les résultats sont présentés dans la (**Figure 36**).



**Figure 36 :** La plaque de dosages des flavonoïdes des extraits et des huiles des plantes d'intérêts

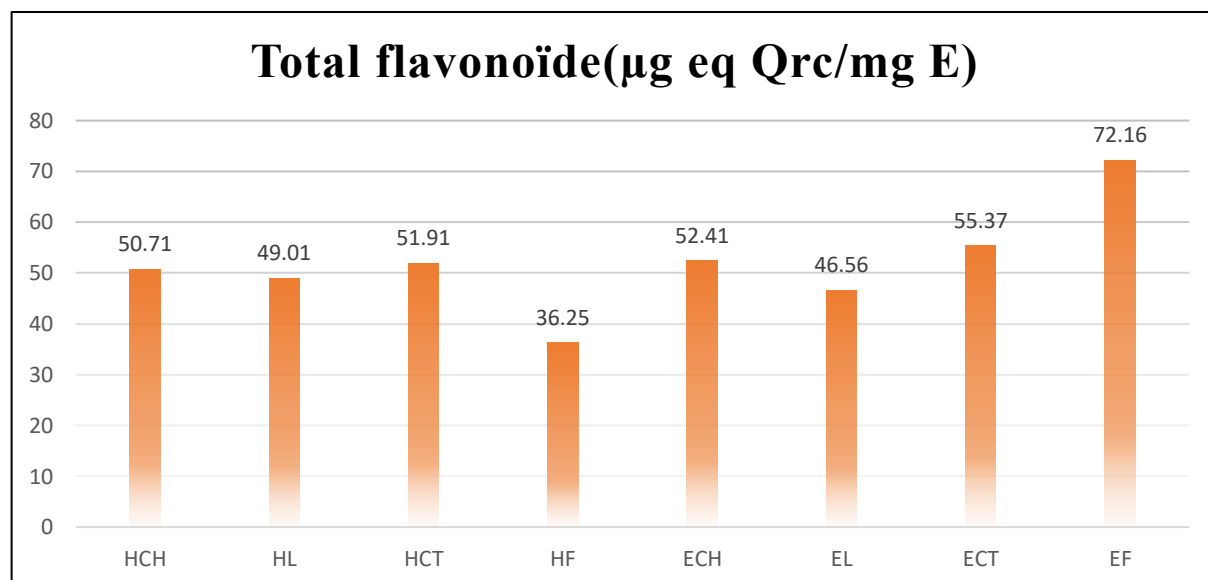
La Quercétine a été utilisée comme étalon. Les résultats sont obtenus à partir d'une courbe d'étalonnage ayant l'équation :  $(Y = 0,0049x + 0,0996)$  avec  $R^2 = 0,993$  (Figure 37).



**Figure 37 :** Courbe d'étalonnage de la Quercétine.

La quantité des flavonoïdes a été rapportée en µg d'équivalent de la quercétine par mg d'extrait ou d'huile (µg Qrc/ mgE).

Les résultats du dosage sont illustrés dans la (figure 38).



**Figure 38 :** Evaluation des flavonoïdes totaux des extraits et des huiles des CH, L, CT et F.

En ce qui concerne les flavonoïdes totaux, les données révèlent également une nette supériorité des extraits méthanoliques par rapport aux huiles. Le EF présente la teneur la plus élevée avec  $72,16 \pm 0,78 \mu\text{g eq Qrc/mgE}$ , confirmant la richesse de cette graine en flavonoïdes hydrosolubles, comme l'ont également rapporté **Rather *et al.*, (2016)**. Suivi de près par le ECT ( $55,37 \pm 1,62 \mu\text{g eq Qrc/mgE}$ ), le ECH ( $52,41 \pm 1,67 \mu\text{g eq Qrc/mgE}$ ) et le EL ( $46,56 \pm 1,88 \mu\text{g eq Qrc/mgE}$ ) ce qui concorde avec les travaux de **Zhou *et al.*, (2019)** ; **Martínez-Cruz *et Paredes-López* (2014)** et **Oomah *et al.*, (2003)**, qui ont mis en évidence la présence de flavonoïdes bioactifs dans ces graines.

Concernant les huiles, le teneur en flavonoïdes reste inférieur à celle des extraits méthanoliques, mais certaines présentent néanmoins des valeurs notables, comme l'HCH ( $50,71 \pm 1,63 \mu\text{g eq Qrc/mgE}$ ), l'HL ( $49,01 \pm 2,66 \mu\text{g eq Qrc/mgE}$ ) et l'HCT ( $51,91 \pm 0,60 \mu\text{g eq Qrc/mgE}$ ), ce qui rejoint les observations de **Siger *et al.*, (2008)** concernant la présence de composés phénoliques dans les huiles végétales pressées à froid. Tandis que le HF enregistre la plus faible teneur ( $36,25 \pm 2,43 \mu\text{g eq Qrc/mgE}$ ) ce qui s'explique par sa composition majoritairement terpénique, caractéristique des huiles essentielles, qui sont naturellement pauvres en flavonoïdes hydrosolubles.

Cette différence entre les extraits et les huiles s'explique par la nature chimique des flavonoïdes, qui sont majoritairement hydrosolubles et donc mieux extraits par des solvants polaires comme le méthanol. D'autres facteurs peuvent également influencer ces teneurs, notamment la composition spécifique des graines, les conditions environnementales (type de sol, climat), la maturité des graines à la récolte, ainsi que les techniques de transformation post-récolte (**Dai *et al.*, 2010**).

## 2. Evaluation de l'activité biologique

### 2.1. Evaluation d'activité antioxydante *in vitro*

Dans cette étude, nous avons évalué l'activité antiradicalaire des huiles et des extraits des quatre graines (chia, lin, fenouil et citrouille) par deux méthodes différentes (le piégeage anti-radicalaire **DPPH** et le pouvoir réducteur **FRAP**). Le tableau ci-dessous présente les valeurs de la CI50 (signifie la concentration qui assure une inhibition à 50 %) et d'A0,5 (signifie la concentration donnant une absorbance égale à 0,5) obtenues pour chaque extrait et huile.

**Tableau 25** : Les valeurs des CI 50 de radical DPPH des huiles et des extraits.

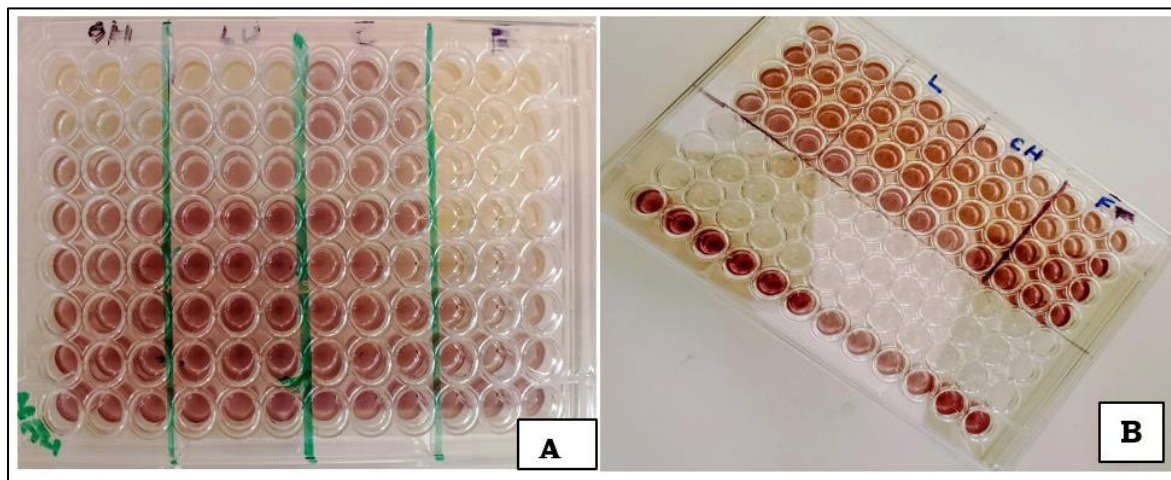
	DPPH en CI 50 (µg/ml)	FRAP en A 0,5 (µg/ml)
HCH	PA	PA
HL	PA	24,11± 0,74 <sup>d</sup>
HCT	797,5±0.08 <sup>a</sup>	293,76± 1,84 <sup>c</sup>
HF	PA	PA
ECH	8,41±0,25 <sup>c</sup>	458,89±5,64 <sup>a</sup>
EL	194 ±49 4,68 <sup>b</sup>	194 ±49 4,68 b
ECT	7,73±0,42 <sup>c</sup>	16,01±1,25 <sup>e</sup>
EF	9,29± 0,16 <sup>c</sup>	14,86±0,37 <sup>e</sup>

**PA** : pas d'activité.

Les valeurs de CI50 nt été calculées par analyse de régression linéaire et sont exprimées sous forme de moyenne ± écart type (n = 3). Les valeurs portant des lettres différentes (a, b, c, d, e) dans une même colonne sont significativement différentes (p < 0,05).

### ○ Test de piégeage du DPPH

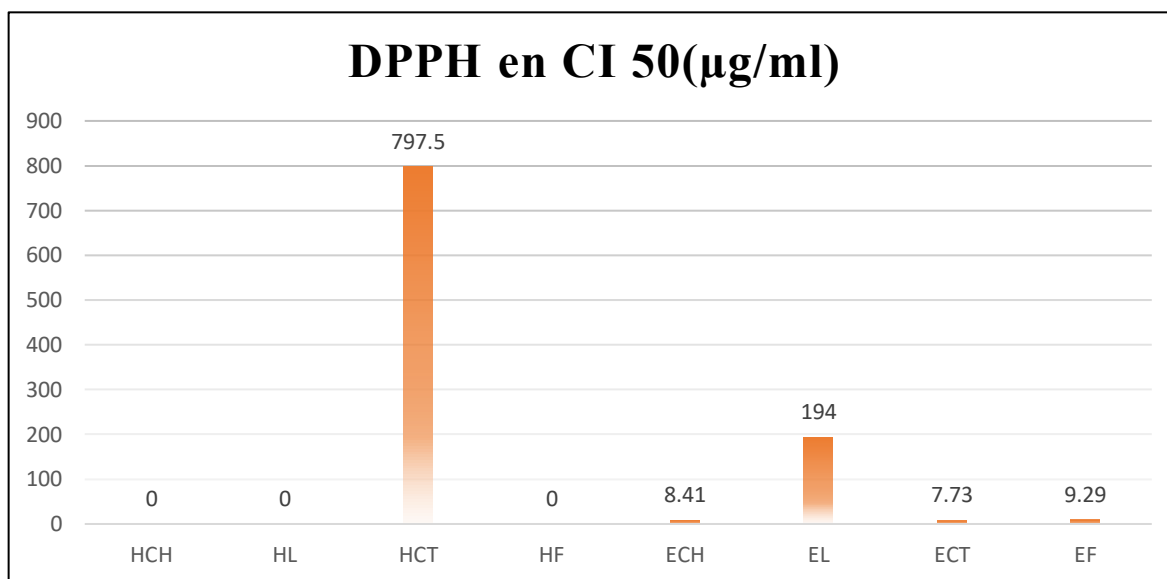
La transformation de la couleur se représente ci-dessous dans la figure 39.



**Figure 39** : Microplaque du test antioxydant contre le radical DPPH des extraits et des huiles

A: les extraits ; B : les huiles

Les résultats de la CI50 du radical libre DPPH par l'extrait méthanolique et l'huile de CH, L, CT et F sont illustrés dans le **Tableau 25**, **figure 39**, **figure 40**.



**Figure 40** : Représentation graphique de la CI 50 des huiles et des extraits de différentes graines.

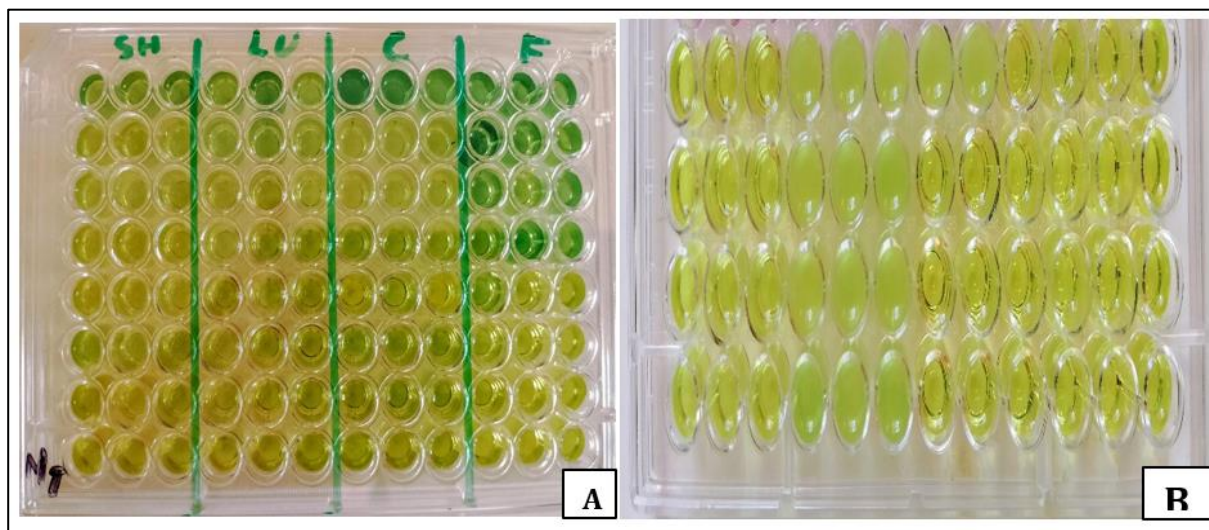
Les résultats montrent une variation marquée de l'activité antioxydante des différents extraits exprimés en CI50. une valeur de CI50 faible traduit une activité antioxydante élevée. Car une plus faible concentration d'extrait est nécessaire pour inhiber 50 % des radicaux libres DPPH.

L'ECT traduit une activité antioxydante très élevée avec une valeur de  $CI_{50}$  très minime  $7,73 \pm 0,42$ , cela indique une richesse en composés phénoliques et en flavonoïdes, qui sont les principaux contributeurs à cette activité. De plus, la présence de terpénoïdes (notamment les tocophérols) ainsi que les composés hydrosolubles tels que l'acide gallique et l'acide tannique sont contribuent à renforcer la capacité de réduction du radical libre DPPH (Murkovic *et al.*, 1999 ; Brand-Williams *et al.*, 1995 ; Popovici, 2009), l'ECH, l'EF et l'EL qui ont une activité antioxydante estimée avec des  $CI_{50}$ :  $8,41 \pm 0,25$ ;  $9,29 \pm 0,16$  et  $194 \pm 494,68$  respectivement ; ce qui indique la présence des composés bioactifs à concentrations variables tel que les composés phénoliques, les flavonoïdes et les terpénoïdes (Khammassi *et al.*, 2023 ; Reyes-Caudillo *et al.*, 2008 ; Goyal *et al.*, 2014). Cependant ; aucune activité antiradicalaire pour l'HCH ; l'HL et l'HF revenir aux teneurs très faibles des huiles en composés phénoliques et flavonoïdes, car l'absence d'activité est liée à la nature lipophile des extraits (Molyneux, 2004). Contrairement l'HCT a une activité antioxydante très faible avec une  $CI_{50}$  :  $797,5 \pm 0,08$ , conformant que les composés bioactifs responsables de l'activité antioxydante dans ce test sont majoritairement hydrophiles, et donc mal extraits par les solvants lipidiques (Reddy *et al.*, 2005)



### ○ Test pouvoir réducteur de fer (FRAP)

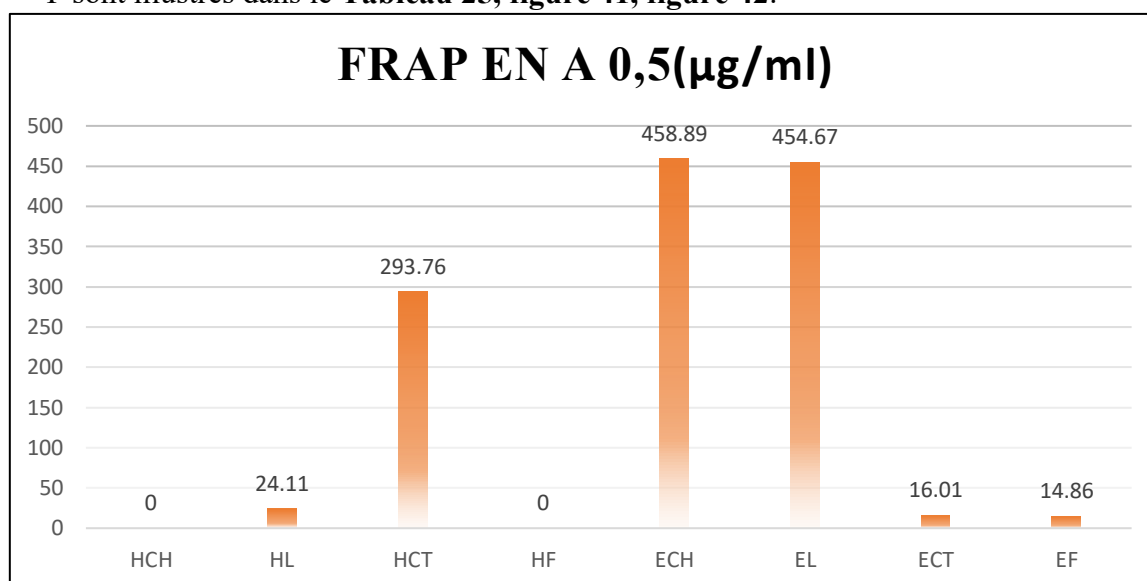
La transformation de la couleur est représentée ci-dessous dans la figure 41 :



**Figure 41 :** Microplaques d'activité antioxydante du pouvoir réducteur FRAP.

A : les extraits ; B : les huiles.

Les résultats de pouvoir réducteur des extraits méthanoliques et des huiles de CH, L, CT et F sont illustrés dans le **Tableau 25**, **figure 41**, **figure 42**.



**Figure 42 :** Représentation graphique de l'A<sub>0,5</sub> (test FRAP) des huiles et des extraits de différentes graines

En comparant les huiles et les extraits des quatre graines (HCH, HL, HCT, HF, ECH, EL, ECT et EF) selon leur activité antioxydante déterminée par la méthode FRAP à la concentration A<sub>0,5</sub>. Les résultats montrent que l'EF présente une excellent activité antioxydante, avec une valeur de A<sub>0,5</sub> de 14,86 ± 0,37 µg/ml, ce qui prouve sa richesse en

composés phénoliques et flavonoïdes, dont les teneurs atteignent respectivement 25,92µg AG/mgE et 72,16µg Qrc/mgE. L'ECT présente une forte activité antioxydante, avec une valeur de A0,5 de  $16,01 \pm 1,25 \mu\text{g/ml}$ , grâce à la présence des composés bioactifs tels que les flavonoïdes et les composés phénoliques hydrosolubles (acide gallique) car les flavonoïdes ont un fort pouvoir réducteur FRAP (Pietta, 2000). L'HL et L'HCT ont une activité antioxydante FRAP modérée avec des valeurs A0,5 de  $24,11 \pm 0,74 \mu\text{g/ml}$  et  $293,76 \pm 1,84 \mu\text{g/ml}$ ; respectivement, à cause de la faible teneur en antioxydants hydrosolubles, ce qui limite leur activité mesurable dans des tests aqueux comme le FRAP (Schaich, 2005). L'EL a une activité antioxydante FRAP faible avec  $454,67 \pm 3,33 \mu\text{g/ml}$  par rapport à sa faible teneur en composés phénoliques  $2,52 \pm 0,35 \mu\text{g/ml}$ . L'ECH a une activité antioxydante FRAP très faible avec  $458,89 \pm 5,64 \mu\text{g/ml}$ , cela est dû à sa richesse en flavonoïdes glycosylés qui sont moins actifs dans le test FRAP (Apak *et al.*, 2016) (Pietta, 2000 ; Ullah *et al.*, 2016 ; Reyes-Caudillo *et al.*, 2008). L'HCH et L'HF n'ont pas une activité antioxydante FRAP en raison de leurs faibles quantités en composés phénoliques glycosylés et hydrosolubles (Meléndez-Martínez *et al.*, 2007 ; Sayed Ahmad *et al.*, 2020).

### 2.2. Évaluation des activités enzymatiques *in vitro*

Dans cette étude, nous avons évalué les activités enzymatiques des huiles et des extraits des quatre graines (chia, lin, fenouil et citrouille) à travers deux tests distincts : l'inhibition de l'acétylcholinestérase et l'inhibition de l' $\alpha$ -amylase.

#### ○ Test d'inhibition de l'acétylcholinestérase

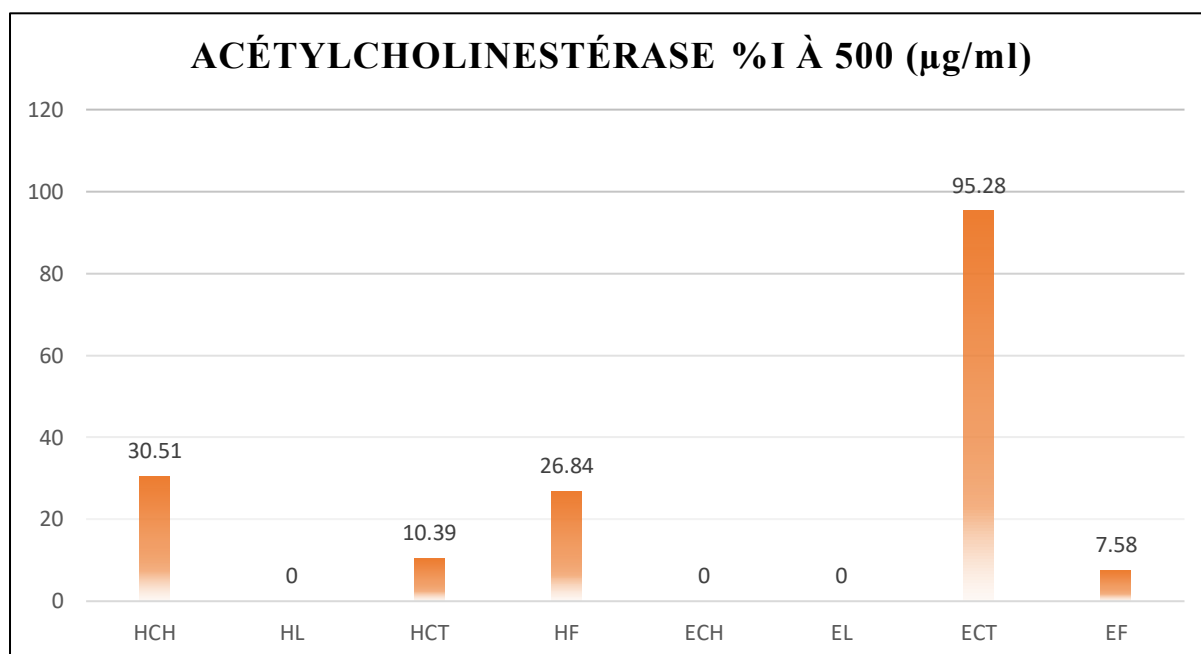
Les résultats de l'inhibition de l'acétylcholinestérase sont montrés dans l'histogramme et le tableau ci-dessous :

**Tableau 26 :** Les pourcentages d'inhibition d'Acétylcholinestérase des huiles et des extraits.

	Acétylcholinestérase %I à 500 µg/ml
<b>HCH</b>	30,51±0,13 <sup>b</sup>
<b>HL</b>	PA
<b>HCT</b>	10,39±1,29 <sup>d</sup>
<b>HF</b>	26,84±0,60 <sup>c</sup>
<b>ECH</b>	PA
<b>EL</b>	PA
<b>ECT</b>	95,28±0,86 <sup>a</sup>
<b>EF</b>	7,58±0,47 <sup>c</sup>

PA : pas d'activité.

Les valeurs de CI50 ont été calculées par analyse de régression linéaire et sont exprimées sous forme de moyenne ± écart type (n = 3). Les valeurs portant des lettres différentes (a, b, c, d, e) sont significativement différentes (p < 0,05).



**Figure 43 :** Représentation graphique comparant le pourcentage d'inhibition d'acétylcholinestérase des huiles et les extraits des différentes graines.

En comparant les valeurs d'inhibition de l'acétylcholinestérase (AChE), on observe une variation significative du pourcentage d'inhibition selon la nature des extraits et huiles issus des quatre types de graines étudiées.

Nos résultats indiquent que l'ECT a un fort effet inhibiteur sur l'enzyme acétylcholinestérase (AChE), avec un pourcentage élevé d'inhibition de  $95,28 \pm 0,86 \mu\text{g/ml}$ . Cette efficacité est liée à l'abondance des substances ayant le potentiel inhibiteur l'AChE, notamment les  $\alpha$ -tocophérols, acide caféique et acide férulique. Plusieurs études ont démontré que l' $\alpha$ -tocophérol peut interférer avec l'activité de l'AChE et ralentir la dégradation de l'acétylcholine (Zueva *et al.*, 2019 ; Mahaman *et al.*, 2023 ; Gülçin *et al.*, 2016). Certaines études expérimentales ont également mis en évidence l'activité antiparkinsonienne de *Cucurbita pepo* (Saleem *et al.*, 2021), ainsi que sa capacité à moduler la locomotion et les fonctions cognitives dans des modèles animaux (modèle de drosophile transgénique A $\beta$ 42 de la maladie d'Alzheimer) (Abubakar *et al.*, 2025), confirmant ainsi le potentiel thérapeutique large de cette graine dans le cadre des maladies neurodégénératives. Une alternative étude *in vivo* a confirmé que l'administration d'un extrait éthanolique de graines de *Cucurbita pepo* chez des rats a régulé l'activité de l'AChE (La Fata *et al.*, 2014) ; ce qui valide ainsi les résultats de notre étude. Nous supposons, appuyés par la littérature, que la présence d' $\alpha$ -tocophérol, d'acide caféique et d'acide férulique dans l'ETJ constitue l'un des principaux facteurs responsables de son activité inhibitrice vis à vis l'AChE (Murkovic *et al.*, 1999 ; Krimer-Malešević *et al.*, 2011).

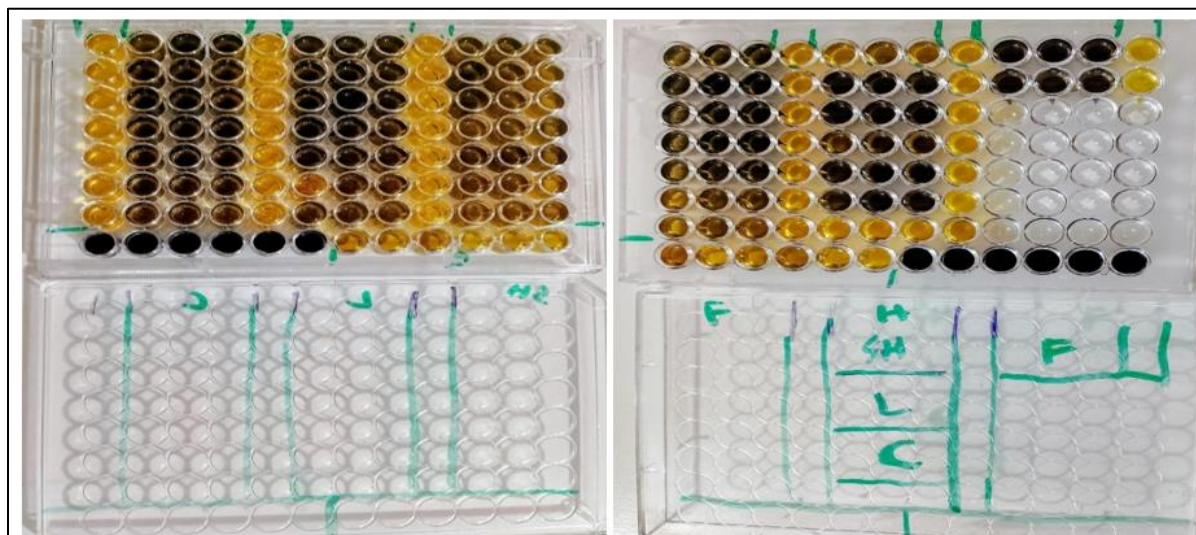
L'HF a montré une inhibition de l'AChE de  $26,84 \pm 0,60 \%$ , tandis que l'EF a présenté une inhibition plus faible, de  $7,58 \pm 0,47 \%$ . Ces résultats indiquent une activité modérée à faible, probablement liée à la richesse de l'huile en composés lipophiles tels que l'anéthol, le fenchol et l'estragole, connus pour leur capacité à interagir avec l'acétylcholinestérase, comme le confirment les études de Morteza Shahriari *et al.*, (2018) ; Mohamed *et al.*, (2016) ; Mitsuo Miyazawa et Chikako Yamafuji, (2005).

L'HCH a montré une faible activité d'inhibition de l'AChE ( $30,51 \pm 0,13\%$ ), tandis que l'ECH n'a présenté aucune activité. Cela pourrait être dû à la richesse de l'huile en tocophérols, contrairement à l'extrait qui en contient très peu. Les  $\alpha$ -tocophérols, composés liposolubles, sont en effet reconnus pour leur potentiel inhibiteur de l'AChE (La Fata *et al.*, 2014 ; Oteri *et al.*, 2023 ; Reboul, 2017).

L'HL et EL n'ont montré qu'une inhibition négligeable de l'AChE, vue la présence notable de SDG, un lignane dont l'effet sur cette enzyme reste limité. Cette faible activité pourrait résulter d'une concentration insuffisante en composés neuroactifs ciblant spécifiquement l'AChE.

## ○ Test d'inhibition de l' $\alpha$ -amylase

Les résultats visuels du test d'inhibition de l'  $\alpha$ -amylase par les extraits et les huiles (la microplaque) sont présentés dans la figure ci-dessous :

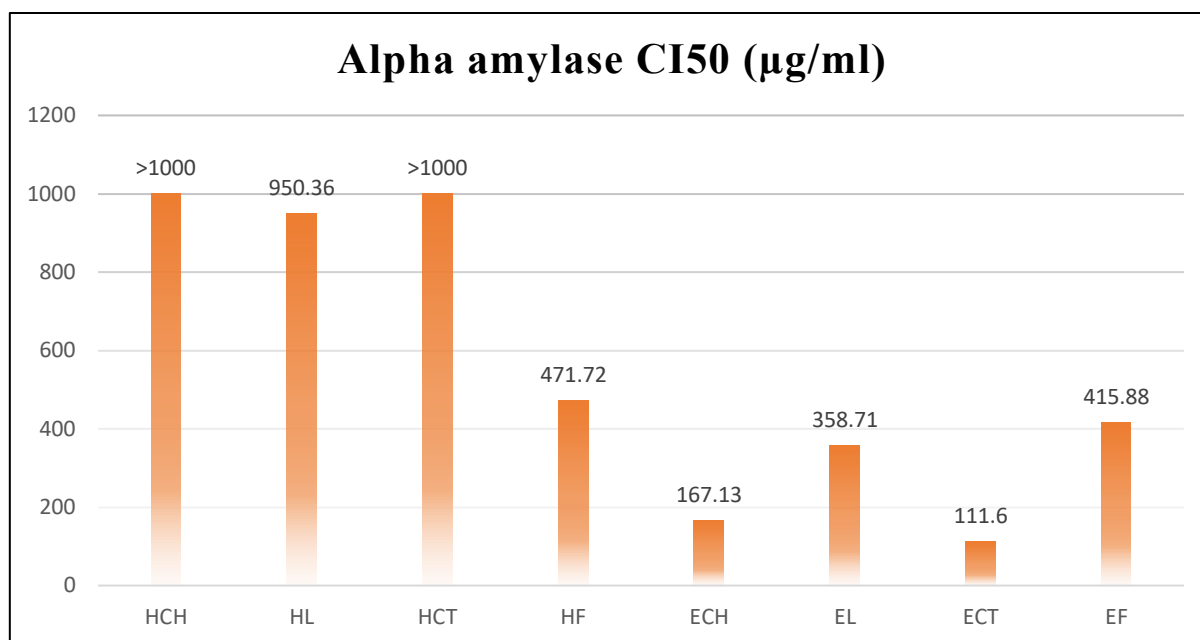


**Figure 44** : Microplaque de l'activité inhibitrice de l'  $\alpha$ -amylase des extraits et des huiles.

Les résultats de l'activité inhibitrice de l'  $\alpha$ -amylase sont montrés dans l'histogramme et le tableau ci-dessous :

**Tableau 27** : les valeurs des CI 50 de l'  $\alpha$ -amylase des huiles et des extraits.

	Alpha amylase CI50 ( $\mu\text{g/ml}$ )
<b>HCH</b>	>1000
<b>HL</b>	950,36 $\pm$ 9,39 <sup>a</sup>
<b>HCT</b>	>1000
<b>HF</b>	471,72 $\pm$ 2,30 <sup>b</sup>
<b>ECH</b>	167,13 $\pm$ 0,42 <sup>c</sup>
<b>EL</b>	358,71 $\pm$ 7,59 <sup>d</sup>
<b>ECT</b>	111,60 $\pm$ 5,59 <sup>f</sup>
<b>EF</b>	415,88 $\pm$ 9,12 <sup>c</sup>



**Figure 45 :** Représentation graphique de la CI 50 des huiles et des extraits des différentes graines par rapport à l'inhibition d'alpha amylase.

En comparant les valeurs d'inhibition de l' $\alpha$ -amylase, on observe une variation significative du CI 50 de l' $\alpha$ -amylase des huiles et des extraits des quatre graines étudiées.

Les extraits EF, EL et ECH montrent des degrés d'inhibition variables avec des CI<sub>50</sub> respectives de :  $415,88 \pm 9,12 \mu\text{g/ml}$ ,  $358,71 \pm 7,59 \mu\text{g/ml}$  et  $167,13 \pm 0,42 \mu\text{g/ml}$ . Cette activité est attribuée à la présence significative de composés phénoliques et de flavonoïdes. (Rather *et al.*, 2016 ; Nattagh-Eshtivani *et al.*, 2025 ; Valdivia-López *et Tecante*, 2015 ; Ćorković *et al.*, 2022).

L'ECT a montré une forte activité anti- $\alpha$ -amylase, avec une CI<sub>50</sub> de  $111,60 \pm 5,59 \mu\text{g/ml}$ , ce qui reflète une forte concentration en composés phénoliques bioactifs notamment l'acide galique, l'acide férulique et la quercétine connus pour leurs effets antidiabétiques (Zheng *et al.*, 2020 ; Adissakwattana 2016 ; Krimer-Malešević *et al.*, 2011 ; Shirmohammadi Yazdi *et al.*, 2025). L'ECH montre un degré d'inhibition excellent avec une CI<sub>50</sub>  $167,13 \pm 0,42 \mu\text{g/ml}$  à cause de la forte teneur en composés bioactifs telle que l'acide gallique, la catéchine, la quercétine et l'acide ascorbique, connus pour leur capacité d'inhibition alpha amylase (Motyka *et al.*, 2022 ; Tavera-Hernández *et al.*, 2023). Dans ce contexte, un complément alimentaire à base de graines de chia a été développé sur la base des recherches antérieures et est commercialisé en destinant les diabétiques (Tavera-Hernández *et al.*, 2023).

Nos résultats indiquent que l'HCH et l'HCT ne présentent aucune activité inhibitrice significative de l' $\alpha$ -amylase, ce qui implique la pauvreté en substances lipophiles qui inhibent l' $\alpha$ -amylase. En effet, les huiles végétales sont principalement composées d'acides gras et sont pauvres en inhibiteurs enzymatiques tels que les polyphénols ou les flavonoïdes (**Oomah *et al.*, 1996**).

L'HF et le HL ont eu une CI50 d'inhibition de l'enzyme  $\alpha$ -amylase faible avec une CI50  $471,72 \pm 2,30 \mu\text{g/ml}$  et  $950,36 \pm 9,39 \mu\text{g/ml}$  ; respectivement traduisent la présence des bioactifs ayant la capacité d'inhiber l' $\alpha$ -amylase mais pas du site actif de l'enzyme. Pour l'HF la molécule ayant été déterminée comme effective pour l'inhibition de cette enzyme est l'anéthol (**Cheikh *et al.*, 2015**) et pour l'HL la molécule d'inhibition a été préalablement prouvé comme le SDG (**Adolphe *et al.*, 2010**).

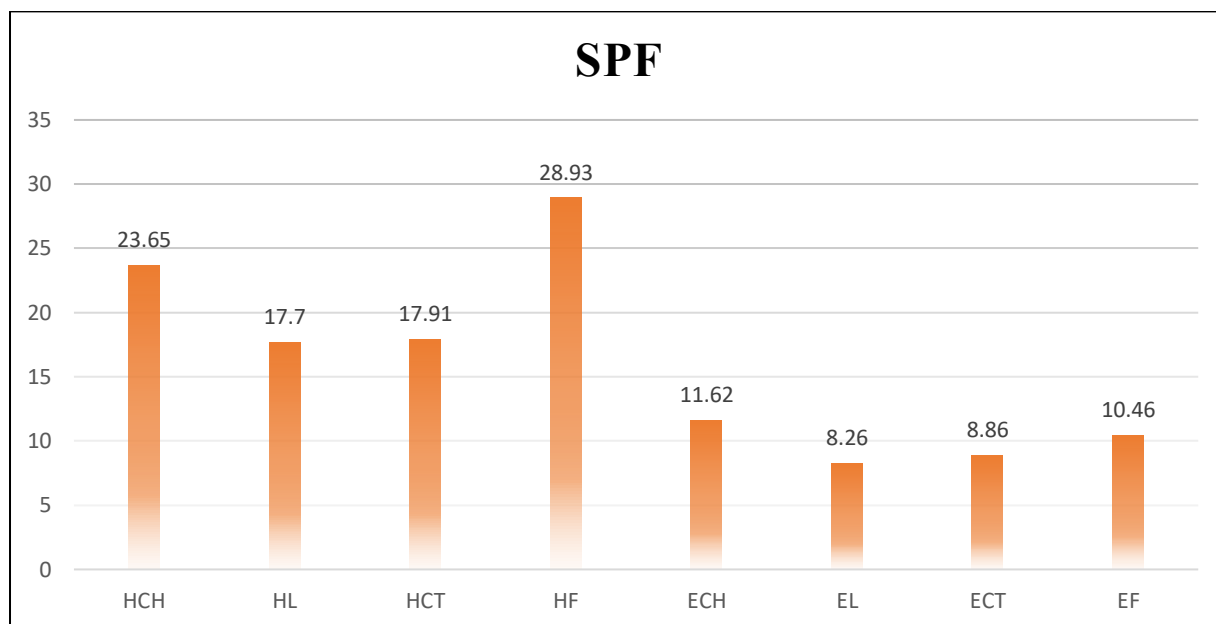
### 2.3. Test de photoprotection *in vitro* (SPF)

Les résultats de SPF sont montrés dans (tableau 24, figure 31)

**Tableau 28 :** Les valeurs SPF des huiles et des extraits.

	SPF
<b>HCH</b>	23,65±0,35 <sup>b</sup>
<b>HL</b>	17,70±0,11 <sup>c</sup>
<b>HCT</b>	17,91±1,06 <sup>c</sup>
<b>HF</b>	28,93±0,17 <sup>a</sup>
<b>ECH</b>	11,62±0,15 <sup>d</sup>
<b>EL</b>	8,26±0,31 <sup>e</sup>
<b>ECT</b>	8,86±0,36 <sup>d,e</sup>
<b>EF</b>	10,46±0,21 <sup>d,e</sup>

Les valeurs SPF sont exprimées sous forme de moyenne ± écart type (n = 3). Les valeurs portant des lettres différentes (a, b, c, d, e) sont significativement différentes (p < 0,05).



**Figure 46 :** Représentation graphique des valeurs de SPF des huiles et des extraits des différentes graines.

En comparant les huiles et les extraits des quatre graines par rapport à leur facteur de protection solaire (SPF). Les résultats montrent que HF présente une activité de protection solaire élevée avec un SPF de (28,93 ± 0,17), ce qui reflète une teneur significative en composés



bioactifs tels que les coumarines, les flavonoïdes lipophiles et les tocophérols (vitamine E). Ces molécules sont reconnues pour leurs propriétés phytoprotectrices, capables d'absorber les rayons UV et de réduire les dommages oxydatifs induits par l'exposition solaire (Marčac Duraković *et al.*, 2024 ; Rather *et al.*, 2016 ; Saewan et Jimtaisong, 2015).

Puis l'HCH a une valeur SPF notable ( $23,65 \pm 0,35$ ). Cette activité est attribuée à la présence de vitamine E, antioxydant liposoluble bien connu pour son rôle dans la protection contre le stress oxydatif induit par les UV (Oteri *et al.*, 2023 ; Thiele *et al.*, 2005). Par ailleurs l'HCT et le HL présentent des valeurs modérées de SPF ( $17,91 \pm 1,06$ ) et ( $17,70 \pm 0,11$ ) respectivement, indiquant la présence de caroténoïdes et de vitamine E. Cependant, leur capacité d'absorption dans la gamme UVB semble plus limitée, ce qui explique leur activité photoprotectrice intermédiaire (Stevenson *et al.*, 2007 ; Gandova *et al.*, 2023 ; Saewan et Jimtaisong, 2015).

L'ECH atteint un SPF de ( $11,62 \pm 0,15$ ), suivi par le EF ( $10,46 \pm 0,21$ ), le ECT ( $8,86 \pm 0,36$ ) et le EL ( $8,26 \pm 0,31$ ), indiquant la faible efficacité observée, ce qui peut être traduit par la présence des composés hydrophiles extraits, dont la capacité d'absorption directe des rayons UV est restreinte, et dont la stabilité photochimique est réduite en solution aqueuse (Saewan et Jimtaisong, 2015).

### 3.4. Activité antifongique des plantes d'intérêts

L'étude vise à évaluer l'effet antifongique des huiles et des extraits méthanoliques de différentes graines (lin, courge, fenouil et chia) sur la croissance de *Fusarium sp.*, un pathogène fongique fréquent dans les cultures céréalières et maraîchères.

Les essais ont été réalisés *in vitro* à l'aide de la méthode de diffusion sur gélose

#### 3.4.1. Effet des huiles des plantes d'intérêt sur la croissance de *Fusarium sp.*

Le tableau ci-dessous représente l'effet inhibiteur des huiles des graines seules ou en combinaison sur la croissance de *Fusarium sp.*

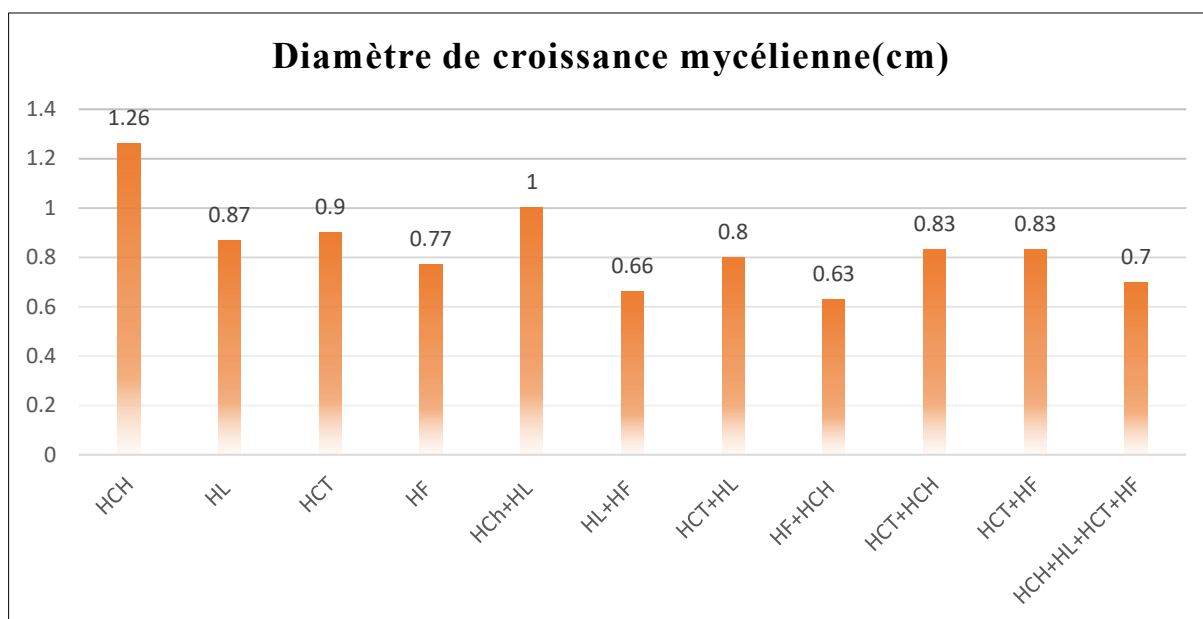
**Tableau 29 :** Effet inhibiteur des huiles des graines seules ou en combinaison sur la croissance de *Fusarium sp.*

Huiles (50 µl)	<i>Fusarium sp.</i>			
	Diamètre de croissance mycélienne(cm)			Moyenne (cm)± Écart-type
<b>HCH</b>	1,3	1,2	1,3	1,26 ± 0,05 <sup>a</sup>
<b>HL</b>	0,9	0,8	0,9	0,87 ± 0,05 <sup>b,c</sup>
<b>HCT</b>	0,9	1	0,8	0,90 ± 0,10 <sup>a,b,c</sup>
<b>HF</b>	0,7	0,8	0,8	0,77 ± 0,06 <sup>b,c</sup>
<b>HCh+HL</b>	0,9	1,1	1	1,00 ± 0,10 <sup>a,b</sup>
<b>HL+HF</b>	0,6	0,6	0,8	0,66 ± 0,11 <sup>c</sup>
<b>HCT+HL</b>	1	0,9	1	0,80 ± 0,10 <sup>b,c</sup>
<b>HF+HCH</b>	0,8	0,8	0,9	0,73± 0,15 <sup>b,c</sup>
<b>HCT+HCH</b>	1	0,9	0,6	0,83± 0,20 <sup>b,c</sup>
<b>HCT+HF</b>	0,7	0,9	0,9	0,83 ± 0,11 <sup>b,c</sup>
<b>HCH+HL+HCT+HF</b>	0,7	0,9	0,7	0,70 ± 0,00 <sup>b,c</sup>

**Témoin (-) :** 0,933 cm (disque mycélien seul → représente la croissance normale de *Fusarium sp* sans traitement) (**Annexe 2**).

Les valeurs DMC (cm) sont exprimées sous forme de moyenne ± écart type (n = 3). Les valeurs portantes des lettres différentes (a, b, c) sont significativement différentes (p <0,05). Les valeurs portantes des lettres identiques, la différence est non significative (p>0,05).

Les résultats sont présentés dans la figure (**figure 35**).



**Figure 47 :** Distribution des diamètres de croissance mycélienne traitait par les huiles.

L'étude montre que les HCH, HL, HCT, HF utilisées seules ou en combinaison, présentent une activité antifongique variable contre *Fusarium sp.* Cette activité pourrait être attribuée à la présence de substances bioactives telles que les flavonoïdes, les polyphénols, phénylpropanoïdes et monoterpènes (**Bouterfas et al., 2023 ; Kocić-Tanackov et al., 2012**).

Dans le cas des huiles seules, l'HF s'est révélé la plus efficace, réduisant significativement la croissance mycélienne à  $0,77 \pm 0,06$  (cm) de diamètre, cette efficacité intéressante de l'HF peut être attribuée à sa richesse en composés bioactifs tels que l'anéthol, la fenchone et l'estragole (Ce sont des composés volatils appartenant majoritairement à la classe des phénylpropanoïdes et monoterpènes), reconnus pour leurs propriétés antifongiques (**Kocić-Tanackov et al., 2012 ; Tian et al., 2012**).

L'HL et l'HCT ont montré un diamètre de croissance mycélienne de  $0,87 \pm 0,05$  cm et  $0,90 \pm 0,10$  cm respectivement. Cette inhibition fongique pourrait être attribuée à leur teneur relativement élevée en polyphénols et flavonoïdes, des composés reconnus pour leurs propriétés antifongiques (**Kocić-Tanackov et al., 2012 ; Nair et al., 2005 ; Haiyan et al., 2007**).

La combinaison HCH+HL+HCT+HF présente la meilleure efficacité, réduisant significativement la croissance mycélienne avec un diamètre de croissance  $0,70 \pm 0,00$  (cm), ces valeurs sont nettement inférieures à celle du témoin (-) (0,933 cm), cela indique une réelle inhibition fongique. De plus, la combinaison des différentes huiles semble produire un effet

synergique, renforçant l'action inhibitrice, comme le confirment les travaux de **Raut *et al.*, (2014)**.

Les travaux de **Sargi *et al.*, (2013)** ont mis en évidence la richesse en acides gras insaturés et en antioxydants de *Salvia hispanica*, ce qui pourrait indirectement contribuer à des effets biologiques tels que l'activité antifongique. Toutefois, dans notre étude, l'HCH a présenté une activité antifongique relativement faible, avec un diamètre de croissance mycélienne de 1,26 cm, supérieur à celui du témoin négatif (**Annexe 2**). Ce résultat paradoxal pourrait s'expliquer par une faible concentration en composés antifongiques dans l'huile testée, ou encore par une éventuelle contamination microbiologique ou oxydative de l'échantillon, susceptible d'avoir altéré sa composition chimique et favorisé le développement du champignon.

### **3.4.2. Effet des extraits méthanoliques à différentes concentrations sur la croissance de *Fusarium sp.***

Les extraits méthanoliques ont été testés à trois concentrations croissantes (30, 15 et 7,5 mg de l'extrait /1ml de DMSO), appliquées à raison de 50 µL par disque. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 30 :** Effets des concentrations croissantes des extraits des plants d'intérêt sur la croissance de *Fusarium sp.*

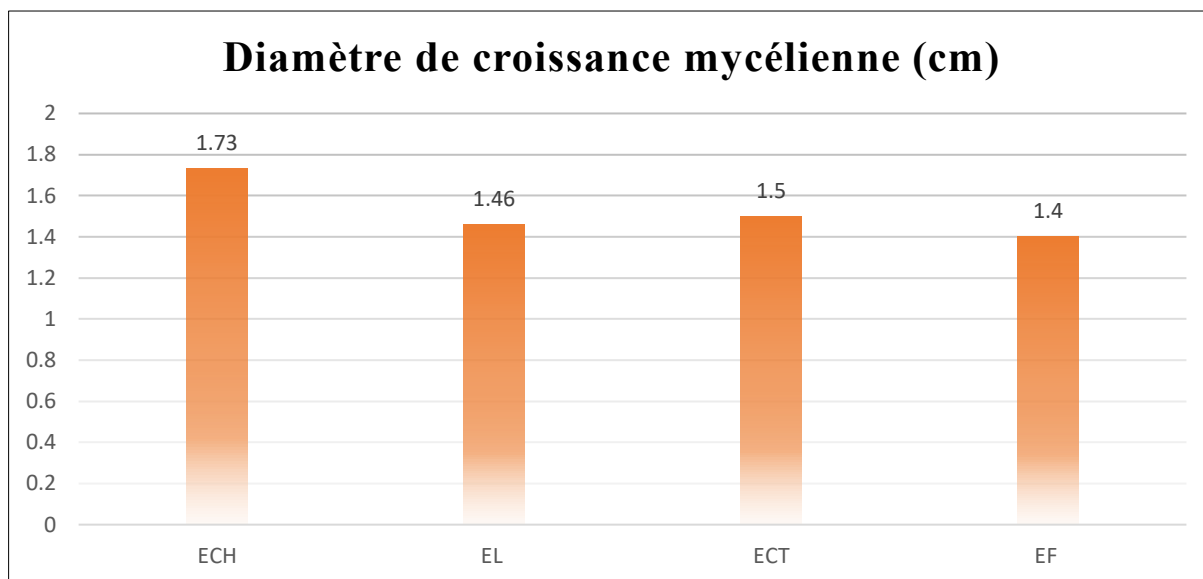
Extrait (50 µl)	<i>Fusarium sp</i>				
	Concentrations (mg E/ml DMSO)	Diamètre de croissance mycélienne (cm)			Moyenne (cm)
ECH	30	1,7	1,8	1,7	1,73 ± 0,06 <sup>A</sup>
	15	1,5	1,5	2	1,67 ± 0,29 <sup>A</sup>
	7,5	1,8	1,9	2	1,90 ± 0,10 <sup>A</sup>
EL	30	1,4	1,5	1,5	1,46 ± 0,06 <sup>B</sup>
	15	1,6	1,5	1,6	1,53 ± 0,05 <sup>A</sup>
	7,5	1,8	1,9	1,8	1,83 ± 0,06 <sup>A</sup>
ECT	30	1,4	1,5	1,6	1,50 ± 0,10 <sup>A,B</sup>
	15	1,5	1,9	1,8	1,73 ± 0,21 <sup>A</sup>
	7,5	1,4	1,9	1,6	1,63 ± 0,25 <sup>A</sup>
EF	30	1,5	1,3	1,4	1,40 ± 0,15 <sup>B</sup>
	15	1,7	1,8	1,7	1,73 ± 0,06 <sup>A</sup>
	7,5	1,8	1,6	1,8	1,73 ± 0,11 <sup>A</sup>

**Témoin (-) :** 2,2 cm (disque mycélien seul → représente la **croissance normale de *Fusarium sp.* sans traitement**).

**Témoin (+) :** 1,87 cm (DMSO + disque mycélien → contrôle du **solvant** → vérifie si le DMSO a un effet antifongique seul).

Les valeurs DMC (cm) sont exprimées sous forme de moyenne ± écart type (n = 3). Les valeurs portantes des lettres différentes (A, B) sont significativement différentes (p < 0,05). Les valeurs portantes des lettres identiques leur différence est non significative (p > 0,05). La comparaison s'est faite pour chaque concentration utilisée (30, 15 et 7,5 mg E/ml DMSO) et chaque couleur dans le tableau représente la comparaison d'une concentration donnée (jaune, vert et bleu), respectivement.

La figure 48, présente les différents diamètres de croissance de l'ECH, l'EL, l'ECT et l'EF dans la concentration 30 mg/ml.



**Figure 48 :** Distribution des diamètres de croissance mycélienne traités par les quatre extraits (concentration de 30 mg/ml).

Une inhibition dose-dépendante de la croissance fongique a été observée : plus la concentration de l'extrait est élevée, plus la croissance de *Fusarium sp.* est réduite. À 30 mg/ml, le EL, ECT, ECH et de EF ont limité la croissance à 1,46 cm, 1,5 cm, 1,73 cm et 1,4 cm, respectivement, contre 2,2 cm pour le témoin (-) et 1,87 cm pour le témoin (+).

L'EL et l'EF ont montré les meilleures activités antifongiques à la concentration de 30 mg/ml, avec des diamètres de croissance mycélienne respectifs de  $1,46 \pm 0,06$  cm et  $1,40 \pm 0,15$  cm. Ces résultats confirment la richesse de ces graines en métabolites secondaires antifongiques tels que les polyphénols, les flavonoïdes, l'anéthol, la fenchone et l'estragole (Kocić-Tanackov *et al.*, 2012 ; Nair *et al.*, 2005). L'ECT a présenté une activité modérée, avec un diamètre de croissance de  $1,50 \pm 0,10$  cm, ce qui pourrait être attribué à sa teneur en polyphénols, flavonoïdes et tocophérols (Haiyan *et al.*, 2007). L'ECH a montré une inhibition fongique plus faible, avec un diamètre de croissance de  $1,73 \pm 0,06$  cm à 30 mg/ml, probablement en raison de la présence de flavonoïdes, de polyphénols et d'acides gras insaturés dans la graine (Sargi *et al.*, 2013)

La différence d'efficacité antifongique observée entre les extraits méthanoliques et les huiles essentielles peut être attribuée à la nature chimique des composés extraits, ces résultats

indiquent que les extraits possèdent une certaine activité antifongique, leur efficacité reste inférieure à celle des huiles.

Ces composés présentent une activité biologique reconnue, mais leur efficacité antifongique reste inférieure à celle des composés lipophiles et volatils, comme les terpènes, majoritairement présents dans les huiles essentielles. Ces derniers sont connus pour leur forte activité antifongique, même à faibles concentrations (**Burt, 2004**).

# **Conclusion et Perspectives**



### Conclusion et perspectives

Les plantes sont depuis longtemps reconnues comme sources importantes de composés bioactifs utilisés en pharmacothérapie, cosmétique et alimentation. Dans le cadre de notre travail, nous avons évalué les activités biologiques (anti-oxydante, anti-fongiques, anti-solaire et anti-enzymatique) des quatre graines végétales chia (*Salvia hispanica*), lin (*Linum usitatissimum*), fenouil (*Foeniculum vulgare*) et citrouille (*Cucurbita pepo*), ainsi que leur teneur en polyphénols et flavonoïdes, cela à travers leurs huiles et leurs extraits méthanoliques. Le dosage des flavonoïdes et polyphénols totaux a confirmé la richesse de ces graines en termes de ces métabolites secondaires. Les extraits de citrouille et de fenouil ont montré une forte activité antioxydante. L'extrait de citrouille a également présenté une bonne inhibition de l'acétylcholinestérase, tandis que les graines de chia ont efficacement inhibé l' $\alpha$ -amylase. L'huile de fenouil s'est révélée particulièrement efficace contre la croissance mycélienne de *Fusarium sp.* Enfin, l'extrait de fenouil a montré une bonne activité photoprotectrice, attribuée à sa richesse en vitamine E. Ce travail ne constitue qu'une initiation à la recherche visant la valorisation scientifique de ces espèces végétales, en tant que sources naturelles de molécules bioactives.

À la lumière de ces résultats, nous pouvons envisager de nouvelles pistes de recherche; dans ce contexte nous proposons de travailler sur :

- Production des fongicides à partir d'extrait de fenouil, afin d'éviter le recours aux fongicides chimiques et de promouvoir des alternatives plus sûres et respectueuses de l'environnement.
- Préparation d'une crème anti solaire à base des huiles essentielles comme l'huile de fenouil, ou bien des huiles végétales comme l'huile de chia.
- Fabrication des compléments alimentaires à base de graines de citrouille est recommandée et est destinée aux personnes atteintes des maladies neurodégénératives comme la maladie d'Alzheimer.
- Réalisation des compléments alimentaires à base de graines de chia pour la maladie de diabète de type 2.

# **Références Bibliographiques**

## Références bibliographiques

### A

- **Adisakwattana, S.** (2016). Influence of gallic acid on  $\alpha$ -amylase and  $\alpha$ -glucosidase inhibitory properties of acarbose. *Journal of Food and Drug Analysis*, 24(3), 627–634. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2016.03.003>
- **Adolphe, J. L., Whiting, S. J., Juurlink, B. H. J., Thorpe, L. U., & Alcorn, J.** (2010). Health effects with consumption of the flax lignan secoisolariciresinol diglucoside. In *British Journal of Nutrition* (Vol. 103, Issue 7, pp. 929–938). <https://doi.org/10.1017/S0007114509992753>
- **Agbagwa, Ikechukwu, Ikechukwu O. Agbagwa, and Benjamin C. Ndukwu.** (2004). “The Value of Morpho-Anatomical Features in the Systematics of *Cucurbita* L. (Cucurbitaceae) Species in Nigeria.” *African Journal of Biotechnology*, 3(10):541–546.
- **Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA).** (2019). *La biologie de *Linum usitatissimum* L. (lin)*. Disponible sur : <https://inspection.canada.ca/en/plant-varieties/plants-novel-traits/applicants/directive-94-08/biology-documents/linum-usitatissimum-flax>
- **Apak, R., Özyürek, M., Güçlü, K., & Çapanoğlu, E.** (2016). Antioxidant activity/capacity measurement. 1. Classification, physicochemical principles, mechanisms, and electron transfer (ET)-based assays. In *Journal of Agricultural and Food Chemistry* (Vol. 64, Issue 5, pp. 997–1027). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b04739>
- **Arráez-Román, D., & Segura Carretero, A.** (2016b). *Advanced Analytical Techniques for the Isolation of Phenolic Compounds in Medicinal Plants*. <https://www.researchgate.net/publication/308801999>
- **Attoumbré, J., Bienaimé, C., Dubois, F., Fliniaux, M. A., Chabbert, B., & Baltora-Rosset, S.** (2010). Development of antibodies against secoisolariciresinol: application to the immunolocalization of lignans in *Linum usitatissimum* seeds. *Phytochemistry*, 71(17–18), 1979–1987.
- **avera-Hernández, R., Jiménez-Estrada, M., Alvarado-Sansininea, J. J., & Huerta-Reyes, M.** (2023). Chia (*Salvia hispanica* L.), a Pre-Hispanic Food in the Treatment of Diabetes Mellitus: Hypoglycemic, Antioxidant, Anti-Inflammatory, and Inhibitory Properties of  $\alpha$ -Glucosidase and  $\alpha$ -Amylase, and in the Prevention of Cardiovascular Disease. *Molecules*, 28(24), 8069. <https://doi.org/10.3390/molecules28248069>
- **Ayerza, R., & Coates, W.** (2004). Composition of chia (*Salvia hispanica*) grown in six tropical and subtropical ecosystems of South America. *Tropical Science*, 44(3), 131–135. <https://doi.org/10.1002/ts.154>
- **Ayerza, R., & Coates, W.** (2005). *Chia: Rediscovering a Forgotten Crop of the Aztecs*.
- **Ayerza, R., and Coates, W.** (1999). “An  $\omega$ -3 Fatty Acid Enriched Chia Diet: Influence on Egg Fatty Acid Composition, Cholesterol and Oil Content.” *Canadian Journal of Animal Science*, 79(1):53–58. <https://doi.org/10.4141/a98-048>
- **Ayerza, R., and Coates, W.** (2004a). “Composition of Chia (*Salvia hispanica*) Grown in Six Tropical and Subtropical Ecosystems of South America.” *Tropical Science*, 44(3):131–135. <https://doi.org/10.1002/ts.154>
- **Ayyildiz, H. F., Topkafa, M., & Kara, H.** (2019). Pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) Seed Oil. In *Fruit Oils: Chemistry and Functionality* (pp. 765–788). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-12473-1\\_41](https://doi.org/10.1007/978-3-030-12473-1_41)

- **Ayyildiz, Hamide Filiz, Mustafa Topkafa, and Huseyin Kara.** (2019). "Pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) Seed Oil." In *Fruit Oils: Chemistry and Functionality*, pp. 765–788. Springer International Publishing.

### B

- **Babadoost, Mohammad, and Thomas A. Zitter.** (2009). "Fruit Rots of Pumpkin: A Serious Threat to the Pumpkin Industry." *Plant Disease*, 93(8):772–782. <https://doi.org/10.1094/PDIS-93-8-0772>
- **Bachir, R.G., & Benali, M.** (2012). Antibacterial activity of fennel essential oil against respiratory pathogens. *International Journal of PharmTech Research*, 4(4), 1619–1623.
- **Badgujar, S. B., Patel, V. V., & Bandivdekar, A. H.** (2014). *Foeniculum vulgare* Mill: A review of its botany, phytochemistry, pharmacology, contemporary application, and toxicology. *BioMed Research International*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/842674>
- **Bate-Smith, E.C.** (1984). Astringent tannins of *Acer* species. *Phytochemistry*, 23(9), 2323–2325.
- **Batool, M., et al.** (2022). Nutritional Value, Phytochemical Potential, and Therapeutic Benefits of Pumpkin (*Cucurbita* sp.). *Plants*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/plants11111394>
- **Baudot, Georges.** (1974). "Los Últimos Años de Fray Bernardino de Sahagún o La Esperanza Inaplazable." *Cahiers Du Monde Hispanique et Luso-Brésilien*, 23(1):23–45. <https://doi.org/10.3406/carav.1974.1947>
- **Bavec, F., S. Grobelnik Mlakar, Č. Rozman, & M. Bavec.** (n.d.). *Oil Pumpkins: Niche for Organic Producers*.
- **Beard, B.H., & Comstock, V.E.** (1980). Flax. In W.R. Fehr & H.H. Hadley (Eds.), *Hybridization of Crop Plants* (pp. 355–376). Madison, WI : American Society of Agronomy.
- **Beard, D.F., & Comstock, V.E.** (1980). *Flax: A Crop of Historical Importance and Modern Utility*. New York: Agricultural Press.
- **Beroual, K., Maameri, Z., Halmi, S., Benleksira, B., Agabou, A., & Hamdi-Pacha, Y.** (2013). Effects of *Linum usitatissimum* L. ingestion and oil topical application on hair growth in rabbit. *Int. J. Med. Arom. Plants*, 3(4), 459–463.
- **Beroual, K., Medouni, S., & Kadi, R.** (2013). Characterization of flaxseed oil and its application in food preservation. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 5(12), 1221–1226.
- **Blois, M.S.** (1958). Antioxidant determinations by the use of a stable Free Radical. *Nature*, 181, 1199–1200.
- **Bohm, B.A.** (1977). *Introduction to Flavonoid*. Harwood Academic Publishers.
- **Boizot, N., & Charpentier, J.P.** (2006). Méthodes d'étude des polyphénols et de l'activité antioxydante. *Innovations Agronomiques*, 6, 23–36.
- **Boizot\_cahier-tech-INRA2006 phenolique 2.** (n.d.).
- **Bolsheva, N.L., et al.** (2015). The diversity of karyotypes and genomes within section *Syllinum* of the genus *Linum* (Linaceae) revealed by molecular cytogenetic markers and RAPD analysis. *PLoS ONE*, 10(4), e0122015.
- **Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C.** (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. 28(1), 25–30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008)
- **Brossi, A.** (1989). *The Alkaloids: Chemistry and Pharmacology*, Vol. 35. Academic Press

- **Bruneton, J.** (1999). *Pharmacognosie: Phytochimie, plantes médicinales* (3e éd.). Lavoisier. **C**
- **Calatayud, A., Barreno, E., & Del Campo, E. M.** (2021). Terpenes: Biosynthesis, natural roles and applications. In *Plant Secondary Metabolites*. Springer.
- **Carter, J. F.** (1996). Sensory evaluation of flaxseed of different varieties. *Proceedings of the 56th Flax Institute of the United States*, 201–203.
- **Cheikh, B. A., Pari, L., Rathinam, A., & Chandramohan, R.** (2015). *Trans-anethole, a terpenoid, improves hyperglycemia by regulating key enzymes of carbohydrate metabolism in streptozotocin-induced diabetic rats*. *Biochimie*, 112, 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2015.02.008>
- **Chemat, F., Tomao, V., & Viot, M.** (2006). Solid-liquid extraction of edible and medicinal oils. In: Chemat, F. (Ed.), *Modern Extraction Techniques of Natural Products*. Presses Universitaires de Provence.
- **Chemat, F., Zill-e-Huma, & Khan, M. K.** (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(4), 813–83
- **Chemical composition and antifungal effect of essential oil of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) from Turkey.** *Journal of Medicinal Food*, 9(3), 552–556. <https://doi.org/10.1089/jmf.2006.9.552>
- **Ćorković, I., Gašo-Sokač, D., Pichler, A., Šimunović, J., & Kopjar, M.** (2022). Dietary Polyphenols as Natural Inhibitors of  $\alpha$ -Amylase and  $\alpha$ -Glucosidase. In *Life* (Vol. 12, Issue 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/life12111692>
- **Cortés, Daniela, Herman Silva, Cecilia Baginsky, and Luis Morales.** (2017). Climatic Zoning of Chia (*Salvia hispanica* L.) in Chile Using a Species Distribution Model. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 15(3). <https://doi.org/10.5424/sjar/2017153-9935>
- **Crozier, A., Jaganath, I. B., & Clifford, M. N.** (2007). Phenols, Polyphenols and Tannins: An Overview. In *Plant Secondary Metabolites: Occurrence, Structure and Role in the Human Diet* (pp. 1–24). John Wiley and Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470988558.ch1>
- **Crozier, A., Jaganath, I. B., & Clifford, M. N.** (2007). Phenols, polyphenols and tannins: An overview. In *Plant Secondary Metabolites*. Blackwell Publishing.
- **Cunnane, S. C., et al.** (1995). Nutritional attributes of traditional and new flaxseed products. *The American Journal of Clinical Nutrition*.
- **Cunnane, S. C., Hamadeh, M. J., Liede, A. C., Thompson, L. U., Wolever, T. M. S., & Jenkins, D. J. A.** (1995). Nutritional attributes of traditional and new flaxseed products. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 62(3), 618–625. <https://doi.org/10.1093/ajcn/62.3.618>

### D

- **Dai, J., & Mumper, R. J.** (2010). Plant phenolics: Extraction, analysis and their antioxidant and anticancer properties. *International Journal of Molecular Sciences*, 11(3), 622–646. <https://doi.org/10.3390/ijms1103062>

- 
- **Das, Akan.** (2017). Advances in Chia Seed Research. *Advances in Biotechnology & Microbiology*, 5(3). <https://doi.org/10.19080/aibm.2017.05.555662>
- **De Luca, V., & St-Pierre, B.** (2000). The cell and developmental biology of alkaloid biosynthesis. *Trends in Plant Science*, 5(4), 168–173.
- **Dewick, P. M.** (2009). *Medicinal Natural Products: A Biosynthetic Approach* (3rd ed.). Wiley.
- **Downie, S. R., et al.** (2001). Molecular systematics of Old World Apioideae (Apiaceae): relationships among some members of tribe Apieae. *Plant Systematics and Evolution*, 227(1), 57–75.
- **Duke, J. A.** (2002). *Handbook of Medicinal Herbs*. CRC Press.

### E

- **Ehrlich, P. R., & Raven, P. H.** (1964). Butterflies and plants: A study in coevolution. *Evolution*, 18(4), 586–608.
- **Élie, F.** (2022). *Les phénols et les polyphénols*. ResearchGate.
- **El-Adl, Magda F., Mohamed A. Deyab, Mai A. Ghazal, & Abdelgawad Y. Elsadany.** (2022). “Impact of the Microalga *Dunaliella Salina* (Dunal) Teodoresco Culture and Its  $\beta$ -Carotene Extract on the Development of Salt-Stressed Squash (*Cucurbita Pepo* L. Cv. Mabrouka).” *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 28(4), 749–762. <https://doi.org/10.1007/s12298-022-01176-6>
- **Elie, F.** (2022). *Structure des polyphénols*. Université de Montpellier (support de cours).
- **Ellman, G. L., Courtney, K. D., Andres, V., & Featherstone, R. M.** (1961). A new and rapid colorimetric determination of acetylcholinesterase activity. *Biochemical Pharmacology*, 7, 88–95.
- **E. S. Oplinger, E. A. Oelke, J. D. Doll, L. G. Bundy, & R. T. Schuler.** (2008). *Flax*. <http://www.hort.purdue.edu/newcrop/afem/flax.html> (lien mal saisi corrigé)

### F

- **Feller, C., Bleiholder, H., Buhr, L., Hack, H., He, M., Klose, R., Meier, U., Stauß, R., Van Den Boom, T., & Weber, E.** (1995). *Phänologische Entwicklungsstadien von Gemüsepflanzen II. Fruchtgemüse und Hülsenfrüchte: Codierung und Beschreibung nach der erweiterten BBCH-Skala*. Vol. 47.
- **Fruhbeck, G., et al.** (2001). “Pumpkin seed protein: a potential functional food.” *Nutrition Research*.

### G

- **G. Zengin, et al.** (2014). A comprehensive study on phytochemical characterization of *Haplophyllum myrtifolium* Boiss. endemic to Turkey and its inhibitory potential against key enzymes involved in Alzheimer, skin diseases and type II diabetes. *Industrial Crops and Products*, 53, 244–251.
- **Gandova, V., Teneva, O., Petkova, Z., Iliev, I., & Stoyanova, A.** (2023). Lipid Composition and Physicochemical Parameters of Flaxseed Oil (*Linum usitatissimum* L.) from Bulgaria. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/app131810141>



- **Garnéro, J.** (1996). *Huiles essentielles. Techniques de l'Ingénieur. Traité Constantes physico-chimiques*, 345: 39 p.
- **Goyal, A., Sharma, V., Upadhyay, N., Gill, S., & Sihag, M.** (2014). Flax and flaxseed oil: an ancient medicine & modern functional food. *Journal of Food Science and Technology*, 51(9), 1633–1653. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1247-9>
- **Grancieri, M., Martino, H. S. D., & de Mejia, E. G.** (2019). Chia seed (*Salvia hispanica* L.) as a source of proteins and bioactive peptides with health benefits: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18, 480–499.
- **Grieve, M.** (1931). *A Modern Herbal*. Penguin Books.
- **Gupta, A., Singh, P., & Bansal, N.** (2013). Chemical composition and pharmacological activity of *Foeniculum vulgare*. *Journal of Pharmacy and Phytotherapy*, 5(5), 92–97.
- **Gupta, R., Kachhwaha, S., & Kothari, S. L.** (2013). Nutritional and therapeutic potential of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.): A review. *International Journal of Plant Sciences*, 8(1), 84–90.
- **Gupta, R., et al.** (2013). “Nutritional and therapeutic potential of fennel (*Foeniculum vulgare*).” *International Journal of Plant Sciences*.
- **Gunstone, F. D.** (2011). *Vegetable Oils in Food Technology: Composition, Properties and Uses*. Wiley-Blackwell.
- **Gutierrez, L., Conejero, G., Castelain, M., Guénin, S., Verdeil, J. L., Thomasset, B., & Van Wuytswinkel, O.** (2006). Identification of new gene expression regulators specifically expressed during plant seed maturation. *Journal of Experimental Botany*, 57(9), 1919–1932.

### H

- **Hamulakova, S., Olsanska, D., Haviernikova, M., Spilovska, K., Korabecny, J., Sepsova, V., & Kristian, P.** (2022). *Natural Compounds as Acetylcholinesterase Inhibitors: A Review. Molecules*, 27(4), 1207. <https://doi.org/10.3390/molecules27041207>
- **Hendawy, S.F., & Ezz El-Din, A.** (2010). Growth and yield of *Foeniculum vulgare* var. azoricum as influenced by some vitamins and amino acids. *Ozean Journal of Applied Sciences*, 3(1), 113–122.
- **Heywood, V. H.** (2007). *Flowering Plant Families of the World*. Royal Botanic Gardens, Kew.
- **Hrnčič, M. K., Ivanovski, M., Cör, D., & Knez, Ž.** (2020). Chia seeds (*Salvia hispanica* L.): An overview—Phytochemical profile, isolation methods, and application. *Molecules*, 25(1). <https://doi.org/10.3390/molecules25010011>
- **Hussain Dar, Aamir, & Shafiya Rafiq.** (n.d.). *Pumpkin the Functional and Therapeutic Ingredient: A Review*.

### I

- **Iauk, L., Lo Bue, A. M., Milazzo, I., Rapisarda, A., & Blandino, G.** (2003). Antibacterial activity of medicinal plant extracts against periodontopathic bacteria. *Phytotherapy Research*, 17(6), 599–604.
- **Ixtaina, V.Y., Nolasco, S. M., & Tomás, M. C.** (2011). Chia (*Salvia hispanica* L.) seed oil: A functional component for food industry. *Food Science and Technology (Campinas)*, 31(2), 377–383. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612011000200019>



### J

John, T. (2000). *Tannins: Their adverse role in ruminant nutrition*. In : Secondary Plant Products.

### K

- **Kadivar, M.** (2001). *Studies on Integrated Processes for the Recovery of Mucilage, Hull, Oil and Protein from Solin (low Linolenic Acid Flax)* (Doctoral dissertation, University of Saskatchewan).
- **Kajla, P., Sharma, A., & Sood, D. R.** (2015). Flaxseed—A potential functional food source. *Journal of Food Science and Technology*, 52(4), 1857–1871. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1293-y>
- **Kacem, R., & Meraihi, Z.** (2006). Chemical composition and antibacterial activity of *Foeniculum vulgare* essential oil. *Research Journal of Microbiology*, 1(5), 387–393.
- **Kapoor, L.D.** (2010). *Handbook of Ayurvedic Medicinal Plants*. CRC Press.
- **Kaur, C., & Kapoor, H. C.** (2009). Antioxidant activity and total phenolic content of some Asian vegetables. *International Journal of Food Science & Technology*, 44(1), 223–228. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2008.01719.x>
- **Kaur, G.J., & Arora, D.S.** (2010). Bioactive potential of *Anethum graveolens*, *Foeniculum vulgare* and *Trachyspermum ammi* belonging to the family Umbelliferae. *Journal of Medicinal Plants Research*, 4(2), 87–94.
- **Khammassi, M., Habiba, K., Mighri, H., Mouna, S., Oumayma, K., Seçer, E., Ismail, A., Jamoussi, B., & Yassine, M.** (2023). Phytochemical Screening of Essential Oils and Methanol Extract Constituents of Wild *Foeniculum vulgare* Mill.: a Potential Natural Source for Bioactive Molecules. *Chemistry Africa*, 6(3), 1227–1240. <https://doi.org/10.1007/s42250-022-00571-6>
- **Khan, M. K., Abert-Vian, M., Fabiano-Tixier, A. S., Dangles, O., & Chemat, F.** (2011). The extraction of polyphenols from plant matrices for functional foods—Development and applications: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 22(3–4), 238–247. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.01.004>
- **Kocić-Tanackov, S., et al.** (2012). Antifungal activity of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) essential oil against *Fusarium* species. *Journal of Food Processing and Preservation*, 36(6), 479–485. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2011.00506.x>
- **Krimer-Malešević, V., Madarev-Popović, S., Vaštag, Ž., Radulović, L., & Peričin, D.** (2011). **Phenolic acids in pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) seeds** (Chapitre 109). Dans R. V. Preedy, R. R. Watson & V. B. Patel (Éds.), *Nuts and Seeds in Health and Disease Prevention* (pp. 925–932). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-375688-6.10109-4>
- **Kwon, Y.-I., Apostolidis, E., & Shetty, K.** (2007). The Author(s) Journal compilation ©. *Journal of Food Biochemistry*, 31. (incomplet, vérifier titre exact)

### L

- **Lamblin, F., et al.** (2007). Lignans: Natural antioxidants in food and medicine. *Phytochemistry Reviews*, 6(3), 445–459.
- **Lang, Q., & Wai, C. M.** (2001). Supercritical fluid extraction in herbal and natural product studies – a practical review. *Talanta*, 53(4), 771–782.
- **Latif, S., & Anwar, F.** (2011). Aqueous enzymatic sesame oil and protein extraction. *Bioresource Technology*, 102(3), 3709–3714.

- **Lazouni, H.A., Benmansour, A., Taleb-Bendiab, S.A., & Chabane Sari, D.** (2007). Composition des constituants des huiles essentielles et valeurs nutritives du *Foeniculum vulgare* Mill. *Sciences & Technologie C*, 25, 7–12.
- **La Fata, G., Weber, P., & Mohajeri, M. H.** (2014). Effects of Vitamin E on Cognitive Performance during Ageing and in Alzheimer's Disease. In *Nutrients* (Vol. 6, Issue 12, pp. 5453–5472). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/nu6125453>
- **Lucchesi, M. E., Chemat, F., & Smadja, J.** (2004). Solvent-free microwave extraction of essential oil from aromatic herbs: comparison with conventional hydro-distillation. *Journal of Chromatography A*, 1043(2), 323–327.

### M

- **Mahaman, Y. A. R., Huang, F., Salissou, M. T. M., Yacouba, M. B. M., Wang, J.-Z., Liu, R., Zhang, B., Li, H.-L., Zhu, F., & Wang, X.** (2023). *Ferulic Acid Improves Synaptic Plasticity and Cognitive Impairments by Alleviating the PP2B/DARPP-32/PP1 Axis-Mediated STEP Increase and A $\beta$  Burden in Alzheimer's Disease. Neurotherapeutics*, 20, 1081–1108.
- **Malcolmson, L.** (2015). La graine de lin – un grain ancien, riche en bienfaits pour la santé et en avantages culinaires. *Flax Council of Canada*.
- **Malcolmson, L.J., Przybylski, R., & Daun, J.K.** (2000). Flaxseed: A functional food source. *AOCS Press*.
- **MANSUR, J. S., BREDER, M. N. R., MANSUR, M. C. A., & AZULAY, R. D.** (1986). Détermination du facteur de protection solaire par spectrophotométrie. *An. Bras. Dermatol.*, 61, 121–124.
- **Marčac Duraković, N., et al.** (2024). Recovery of fennel non-polar bioactives via supercritical carbon dioxide extraction. *Processes*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/pr12081764>
- **Martínez-Cruz, O., & Paredes-López, O.** (2014). *Phytochemical profile and nutraceutical potential of chia seeds*. *Food Reviews International*, 30(2), 148–162. <https://doi.org/10.1080/87559129.2014.890091>
- **Mazur, W.** (1998). Phytoestrogen content in foods. *Environmental Health Perspectives*, 106(Suppl 3), 775–779.
- **Meléndez-Martínez, A. J., Vicario, I. M., & Heredia, F. J.** (2007). Carotenoid pigments: Structural and physicochemical considerations. (*Source à compléter*)
- 
- **Milder, I.E.J., Arts, I.C.W., van de Putte, B., Venema, D.P., & Hollman, P.C.H.** (2005). Lignan contents of Dutch plant foods. *British Journal of Nutrition*, 93(3), 393–402. <https://doi.org/10.1079/BJN20041337>
- **Milenković, M., et al.** (2022). Comparative study of essential oils from *Foeniculum vulgare* seeds: yield, composition, and activity. *Food Science & Nutrition*, 10(2), 456–468.
- **Miyazawa, M., & Yamafuji, C.** (2005). *Inhibition of acetylcholinesterase activity by bicyclic monoterpenoids*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(5), 1765–1768. <https://doi.org/10.1021/jf040019b>

- **Molyneux, P.** (2004). The use of the stable free radical DPPH for estimating antioxidant activity.
- **Motyka, S., Koc, K., Ekiert, H., Blicharska, E., Czarnek, K., & Szopa, A.** (2022). The Current State of Knowledge on *Salvia hispanica* and *Salviae hispanicae semen* (Chia Seeds). *Molecules*, 27(4), 1207. <https://doi.org/10.3390/molecules27041207>
- **Muñoz, L. A., Cobos, A., Diaz, O., & Aguilera, J. M.** (2013). Chia seed (*Salvia hispanica*): An ancient grain and a new functional food. *Food Reviews International*, 29(4). <https://doi.org/10.1080/87559129.2013.818014>
- **Müller, L., Gnoyke, S., Popken, A. M., & Böhm, V.** (2010). Antioxidant capacity of fruit formulations. *LWT - Food Science and Technology*, 43, 992–999.
- **Munteanu, I. G., & Apetrei, C.** (2021). Analytical methods used in determining antioxidant activity: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(7). <https://doi.org/10.3390/ijms22073380>
- **Murkovic, M., Hillebrand, A., Draxl, S., Pfannhauser, W., & Winkler, J.** (1999). Distribution of fatty acids and vitamin e content in pumpkin seeds {cucurbita pepo l.) in breeding lines. *Acta Horticulturae*, 492, 47–55. <https://doi.org/10.17660/actahortic.1999.492.5>

### N

- **Nauman Sab Oil Company.** (2023). *Technical Sheet – Fennel Seed Oil*. <https://naumansaboilcompany.com>
- **Nattagh-Eshtivani, E., et al.** (2025). The effects of flaxseed supplementation on metabolic syndrome risk factors: A comprehensive review. *Clinical Nutrition Open Science*, 60, 262–285. <https://doi.org/10.1016/j.nutos.2025.02.010>
- **Nwozo, S. O., Orojobi, B. F., & Adaramoye, O. A.** (2015). Antioxidant and hepatoprotective potential of pumpkin seed oil on ethanol-induced oxidative stress in rats. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2015, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2015/351394>

### O

- **Oomah, B. D., Mazza, G., & Kenaschuk, E. O.** (1996). Flavonoid content of flaxseed. Influence of cultivar and environment. *Euphytica*, 90(2), 163–167. <https://doi.org/10.1007/bf00023854>
- **Oomah, B. D., Mazza, G., & Kenaschuk, E. O.** (1998). Enzyme inhibition by wheat phenolics. *Cereal Chemistry*, 75, 112–117.
- **Oomah, B. D.** (2001). Flaxseed as a functional food source. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81(9), 889–894. <https://doi.org/10.1002/jsfa.898>
- **Oomah, B. D., Kenaschuk, E. O., Mazza, G., & Przybylski, R.** (2003). Flavonoid and lignan contents of flaxseed: influence of cultivar and environment. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(5), 1645–1649. <https://doi.org/10.1021/jf025918s>
- **Oteri, M., Bartolomeo, G., Rigano, F., Aspromonte, J., Trovato, E., Purcaro, G., Dugo, P., Mondello, L., & Beccaria, M.** (2023). Comprehensive Chemical Characterization of Chia (*Salvia hispanica* L.) Seed Oil with a Focus on Minor Lipid Components. *Foods*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/foods12010023>

### P

- **Pandey, A., & Gokhale, M.** (2018). *Coumarins: Biology, applications and pharmacology*. Springer.
- **Pareek, A., Sagar, N. A., Sharma, S., & Kumar, V.** (2011). Medicinal properties of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.): A review. *Journal of Spices and Aromatic Crops*, 20(1), 16–27.
- **PDR for Herbal Medicines.** (2007). *Physicians' Desk Reference*. Thomson Healthcare.
- **Petropoulos, S. A., Fernandes, Â., Barros, L., & Ferreira, I. C. F. R.** (2021). Chemical composition, nutritional value and biological properties of linseed oil: Cold-pressed oil as a health-promoting ingredient. *Trends in Food Science & Technology*, 118, 250–263. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.09.002>
- **Pietta, P. G.** (2000a). Flavonoids as antioxidants. In *Journal of Natural Products* (Vol. 63, Issue 7, pp. 1035–1042). <https://doi.org/10.1021/np9904509>
- **Popovici, C.** (2009). *Evaluation de l'activité antioxydant des composés phénoliques par la réactivité avec le radical libre DPPH*. <https://www.researchgate.net/publication/271516531>

### R

- **Raffo, A., Paoletti, F., & Antonelli, M.** (2004). Analysis of volatile compounds and fatty acids of fennel seeds. *Journal of Chromatography A*, 1054(1–2), 89–95.
- **Ratnam, Neel, Vandana, Md Najibullah, & Md Ibrahim.** (2017a). A Review on Cucurbita Pepo. *International Journal of Pharmacognosy and Phytochemical Research*, 9(09). <https://doi.org/10.25258/phyto.v9i09.10305>
- **Rather, L. J., Dar, B. A., Sofi, S. A., Bhat, B. A., & Qurishi, M. A.** (2016). Phytochemical screening and estimation of total phenolic and flavonoid content in *Foeniculum vulgare*. *Pharmacognosy Journal*, 8(5), 395–399. <https://doi.org/10.5530/pj.2016.5.13>
- **Rather, M. A., Dar, B. A., Sofi, S. N., Bhat, B. A., & Qurishi, M. A.** (2016). *Foeniculum vulgare: A comprehensive review of its traditional use, phytochemistry, pharmacology, and safety*. *BioMed Research International*, 2016, 1–30. <https://doi.org/10.1155/2016/8426746>
- **Raut, J. S., & Karuppayil, S. M.** (2014). A status review on the medicinal properties of essential oils. *Industrial Crops and Products*, 62, 250–264. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.05.055>
- **Reboul, E.** (2017). Vitamin E Bioavailability: Mechanisms of Intestinal Absorption in the Spotlight. *Antioxidants*, 6(4), 95. <https://doi.org/10.3390/antiox6040095>
- **Reddy, V., Urooj, A., & Kumar, A.** (2005). Evaluation of antioxidant activity of some plant extracts and their application in biscuits. *Food Chemistry*, 90(1–2), 317–321. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.05.038>
- **Reverchon, E., & De Marco, I.** (2006). Supercritical fluid extraction and fractionation of natural matter. *Journal of Supercritical Fluids*, 38(2), 146–16
- **Reyes-Caudillo, E., Tecante, A., & Valdivia-López, M. A.** (2008). Dietary fibre content and antioxidant activity of phenolic compounds present in Mexican chia (*Salvia*

- *hispanica* L.) seeds. *Food Chemistry*, 107(2), 656–663.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.08.062>
- **Ryan, E.**, et al. (2007). *Fatty acid and phytosterol content of seeds from 9 plant species relevant to human nutrition. Food Chemistry*.

## S

- **Saewan, N.**, & **Jimtaisong, A.** (2015). Natural products as photoprotection. *Journal of Cosmetic Dermatology* (Vol. 0).
- **Saeed, M.**, et al. (2022). Microwave-assisted extraction of bioactive compounds from plant materials: Applications and challenges. *Food Chemistry*, 373, 131591.
- **Saharkhiz, M. J., & Tarakeme, A.** (2011). Essential oil content and composition of fennel (*foeniculum vulgare* l.) fruits at different stages of development. *Journal of Essential Oil-Bearing Plants*, 14(5), 605–609.  
<https://doi.org/10.1080/0972060X.2011.10643978>
- **Salim, N., Halima, B., Nabila, A., Ibrahim, D., Med Ali, B. A., & Ahmed, L.** (2020). Evaluation of the antioxidant activity of phenolic extracts from pomegranate bark (*Punica granatum* L). *South Asian Journal of Experimental Biology*, 10(3), 162–168.  
[https://doi.org/10.38150/sajeb.10\(3\).p162-168](https://doi.org/10.38150/sajeb.10(3).p162-168)
- **Shirmohammadi Yazdi, M., Heidari, R., Panahi, N., Chamanara, M., & Nourmohammadi, A.** (2025). Protective Effects of Quercetin-Loaded Pumpkin Seed Oil Nano-Emulsion on Testosterone-Induced Benign Prostatic Hyperplasia in Rats. *Iranian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 21(1), 165–176.  
<https://doi.org/10.22037/ijps.v21i1.46132>
- **Sidar, A., Voshol, G. P., Vijgenboom, E., & Punt, P. J.** (2023). *Novel Design of an  $\alpha$ -Amylase with an N-Terminal CBM20 in Aspergillus niger Improves Binding and Processing of a Broad Range of Starches. Molecules*, 28(13), 5033.  
<https://doi.org/10.3390/molecules28135033>
- **Sapio, O. DI, Busilacchi, H., & Cecilia, S.** (2012). Morphoanatomical characterization of *Salvia hispanica* L. (LAMIACEAE) leaf, stem, fruit and seed. (*Titre de revue manquant*)
- **Sargi, S. C., Silva, B. C., Santos, H. M. C., Montanher, P. F., Boeing, J. S., Santos Junior, O. O., & Visentainer, J. V.** (2013). Antioxidant capacity and chemical composition in seeds rich in omega-3: Chia, flax, and perilla. *Food Science and Technology (Campinas)*, 33(3), 541–548.  
<https://doi.org/10.1590/S0101-20612013005000052>
- **Sayed Ahmad, B., Talou, T., Saad, Z., Hijazi, A., Cerny, M., Kanaan, H., Chokr, A., & Merah, O.** (n.d.). Fennel oil and by-products seed characterization and their potential applications. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.10.008>
- **Schaich, K. M.** (2005). Lipid Oxidation: Theoretical Aspects. In *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/047167849x.bio067>
- **Schoonhoven, L. M., van Loon, J. J., & Dicke, M.** (2005). *Insect–plant biology*. Oxford University Press.
- **Shahidi, F.**, & **Ambigaipalan, P.** (2015). Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: Antioxidant activity and health effects – A review. *Journal of Functional Foods*, 18, 820–897.
- **Shatar, S.** (2020). *Medicinal Plants of the Mediterranean: Distribution and Conservation*. Springer.



- Siger, A., Nogala-Kalucka, M., & Lampart-Szczapa, E. (2008). *The content and antioxidant activity of phenolic compounds in cold-pressed plant oils*. *Journal of Food Lipids*, 15(2), 137–149. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4522.2007.00107.x>
- Silvia Taga, M., Miller, E., & De Pratt. (1970). Chia Seeds as a Source of Natural Lipid Antioxidants. (*Vol. 53, revue à préciser*)
- Simon, J. E., Quinn, J., & Murray, R. G. (1984). *Herbs: An indexed bibliography*. Archon Books.
- Singleton, V.L., & Rossi, J.A.J. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16, 144–158.
- Singh, G., Maurya, S., & Catalan, C. (2006). Chemical constituents, antifungal and antioxidative potential of *Foeniculum vulgare* volatile oil and its acetone extract. *Food Control*, 17, 745–752.
- Stevenson, D.G., et al. (2007). Oil and Tocopherol Content and Composition of Pumpkin Seed Oil in 12 Cultivars. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(10), 4005–4013. <https://doi.org/10.1021/jf062897h>
- Stevenson, David G., Eller, F. J., Wang, L., Jane, J. L., Wang, T., & Inglett, G. E. (2007). Oil and Tocopherol Content and Composition of Pumpkin Seed Oil in 12 Cultivars. In *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Vol. 55, pp. 4005–4013.
- Summerell, B. A., Leslie, J. F., Backhouse, D., Bryden, W. L., & Burgess, L. W. (2003). *Fusarium: Paul E. Nelson Memorial Symposium*. APS Press.
- Sytar, O., et al. (2012). Phenolic compounds in plants and their impact on health. *Molecules*, 17(7), 9044–907

### T

- Tavera-Hernández, R., Jiménez-Estrada, M., Alvarado-Sansininea, J. J., & Huerta-Reyes, M. (2023). Chia (*Salvia hispanica* L.), a Pre-Hispanic Food in the Treatment of Diabetes Mellitus: Hypoglycemic, Antioxidant, Anti-Inflammatory, and Inhibitory Properties of  $\alpha$ -Glucosidase and  $\alpha$ -Amylase, and in the Prevention of Cardiovascular Disease. In *Molecules* (Vol. 28, Issue 24). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/molecules28248069>
- Thiele, J. J., Hsieh, S. N., & Ekanayake-Mudiyanselage, S. (2005). *Vitamin E: Critical Review of Its Current Use in Cosmetic and Clinical Dermatology*. (*revue à compléter*)
- Thompson, L.U., Chen, J.M., Li, T., Strasser-Weippl, K., & Goss, P.E. (2005). Flaxseed and lignans: Can they reduce the risk of and improve survival from breast cancer? *Nutrition and Cancer*, 51(1), 76–81.
- Thompson, L.U., et al. (2006). Flaxseed and lignans: can they reduce risk of and improve breast cancer survival? *Nutrition and Cancer*.
- Tian, J., Ban, X., Zeng, H., He, J., Chen, Y., & Wang, Y. (2012). Chemical composition and antifungal activity of essential oil from fennel (*Foeniculum vulgare*) against *Fusarium* spp. *International Journal of Food Microbiology*, 144(3), 585–590. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2010.11.026>

- **Topçu, G., Ay, A., Bilici, A., Sarıkürkcü, C., Öztürk, M., & Ulubelen, A.** (2007). A new flavone from antioxidant extracts of *Pistacia terebinthus*. *Food Chemistry*, 103, 816–822.
- **Torre, M. P., Caverio, R. Y., & Calvo, M. I.** (2022). Anticholinesterase Activity of Selected Medicinal Plants from Navarra Region of Spain and a Detailed Phytochemical Investigation of *Origanum vulgare* L. ssp. *vulgare*. *Molecules*, 27(20). <https://doi.org/10.3390/molecules27207100>
- **Torssell, K. B. G.** (1983). *Natural Product Chemistry: A Mechanistic, Biosynthetic and Ecological Approach*. Wiley.
- **Touré, A., & Xueming, X.** (2010). Flaxseed lignans: Source, biosynthesis, metabolism, antioxidant activity, bioactive components, and health benefits. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9(3), 261–269. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2009.00105.x>
- **Tripathi, R., Kala, L., Patel, K., & Soni, A.** (2023). *Pumpkin Seed: Nutritional Composition, Health Benefits*. (revue/source à compléter)
- **TUNÇİL, Y. E., & ÇELİK, Ö. F.** (2019). Total Phenolic Contents, Antioxidant and Antibacterial Activities of Chia Seeds (*Salvia Hispanica* L.) Having Different Coat Color. *Akademik Ziraat Dergisi*, 113–120. <https://doi.org/10.29278/azd.593853>

### U

- **Ullah, R., Nadeem, M., Khalique, A., Imran, M., Mehmood, S., Javid, A., & Hussain, J.** (2016a). *Nutritional and Therapeutic Perspectives of Chia (Salvia Hispanica L.): A Review*. *Journal of Food Science and Technology*, 53(4), 1750–1758.
- **USDA.** (2022). *FoodData Central – Fennel seed oil*. U.S. Department of Agriculture. <https://fdc.nal.usda.gov>

### V

- **Valdivia-López, M. Á., & Tecante, A.** (2015). Chia (*Salvia hispanica*): A Review of Native Mexican Seed and its Nutritional and Functional Properties. In *Advances in Food and Nutrition Research* (Vol. 75, pp. 53–75). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2015.06.002>
- **Valdivia-López, Ma Ángeles, & Tecante, A.** (2015). Même chapitre, même source, mêmes pages → **supprimer l'un des deux**.
- **Vaisey-Genser, M., & Morris, D.H.** (2003). Introduction: History of the cultivation and uses of flaxseed. In A.D. Muir & N.D. Westcott (Eds.), *Flax: The Genus Linum* (pp. 1–21). London: Taylor & Francis.
- **Vastegani, S. M., Khoshnam, S. E., Mansouri, E., Hajipour, S., Ghafouri, S., Bakhtiari, N., Sarkaki, A., & Farbood, Y.** (2023). Neuroprotective effect of anethole against rotenone induced non-motor deficits and oxidative stress in rat model of Parkinson's disease. *Behavioural Brain Research*, 437. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2022.114100>
- **Venugopala, K. N., Rashmi, V., & Odhav, B.** (2013). Review on natural coumarin lead compounds for their pharmacological activity. *BioMed Research International*, 2013, Article ID 963248.

- **Vienna, C.F., Bauer, R., Carle, R., Tedesco, D., Tubaro, A., & Zitterl-Eglseer, K.** (2005).  
Assessment of plants/herbs, plant/herb extracts and their naturally or synthetically produced components as “additives” for use in animal production. *FEED*, 297 p.

### W

- **Westcott, N.D., & Muir, A.D.** (2003). Flaxseed lignan: pharmacokinetics and biological effects relevant to cancer. In A.D. Muir & N.D. Westcott (Eds.), *Flax: The genus Linum* (pp. 243–256). Taylor & Francis.
- **Wichtl, M., & Anton, R.** (2003). *Plantes thérapeutiques. Tradition, pratique officinale, science et thérapeutique*. Paris, pp. 28.
- **Wiermann, R.** (1981).  
The shikimate pathway and the metabolism of aromatic compounds. *Encyclopedia of Plant Physiology*.
- **Wink, M.** (2003). Evolution of secondary metabolites from an ecological and molecular phylogenetic perspective. *Phytochemistry*, 64(1), 3–19.
- **Wink, M.** (2008). Plant secondary metabolism: Diversity, function and its evolution. *Natural Product Communications*, 3(8), 1205–1216.

**Wink, M.** (2010). *Function and biotechnology of plant secondary metabolites* (2nd ed.). Wiley-Blackwell

### X

- **Xingú López, Andrés, González Huerta, Andrés, de la Cruz Torrez, Eulogio, Sangerman-Jarquín, Dora Ma., Orozco de Rosas, Guillermo, & Rubí Arriaga, Martín.** (2010). Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas.” *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(7), 1619–1631

### Z

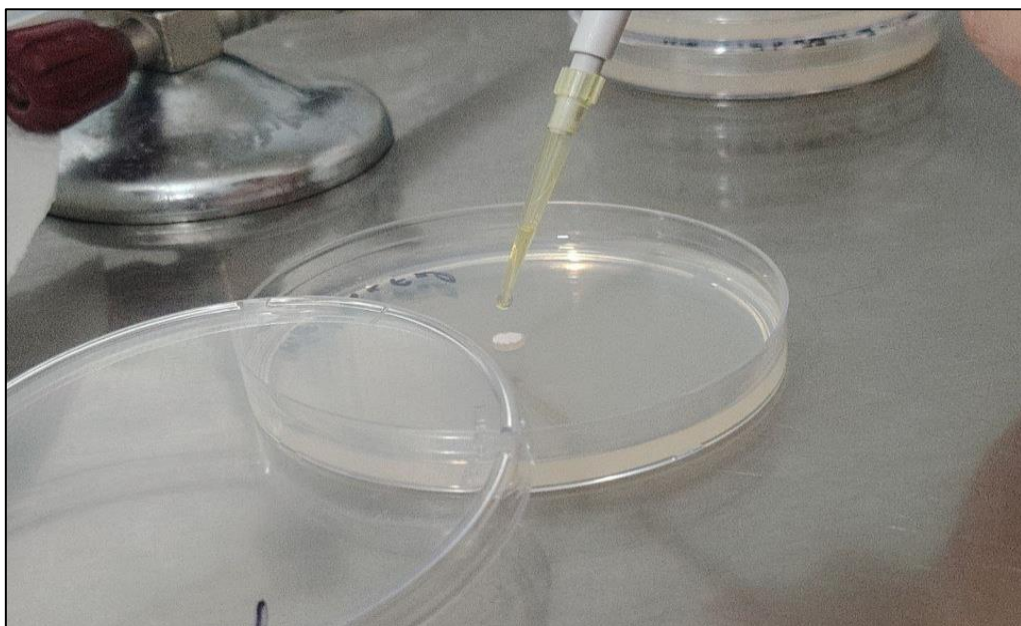
- **Zheng, Y., Tian, J., Yang, W., Chen, S., Liu, D., Fang, F., Zhang, H., & Ye, X.** (2020). Inhibition mechanism of ferulic acid against  $\alpha$ -amylase and  $\alpha$ -glucosidase. *Food Chemistry*, 317, 126346. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126346>
- **Zhou, Y., Zheng, J., Li, S., Zhou, T., Zhang, P., Li, H. B., & Li, Y.** (2019). Nutritional and phytochemical compositions and antioxidant activities of different parts of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). *Food Chemistry*, 295, 676–683. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.132>



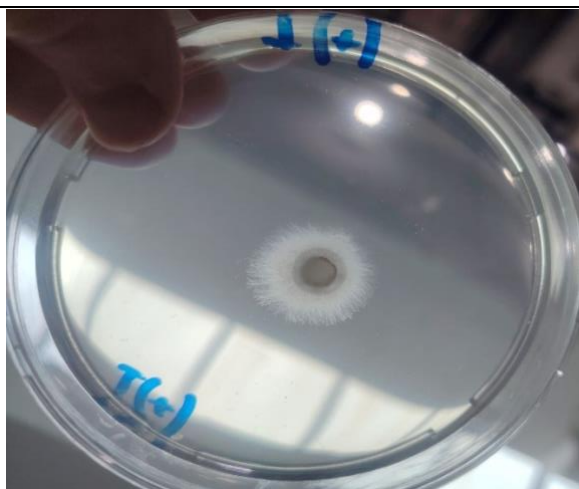
# **Annexes**

## Annexes

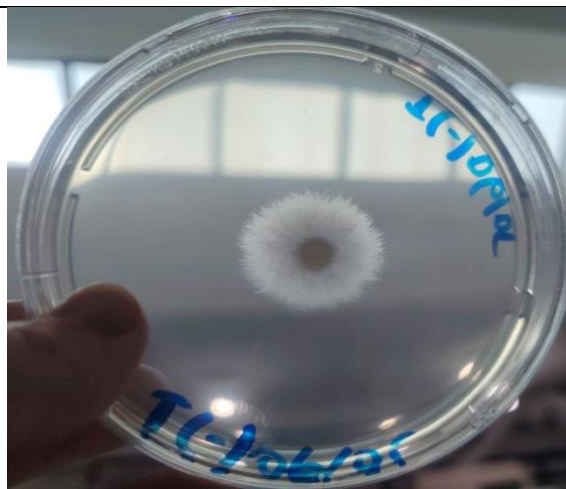
### Annexe 1 : Dépôt des huiles et des extraits sur disque de mycélium : méthode expérimentale



### Annexe 2 : Témoin positif et témoin négatif de *fusarium sp.*



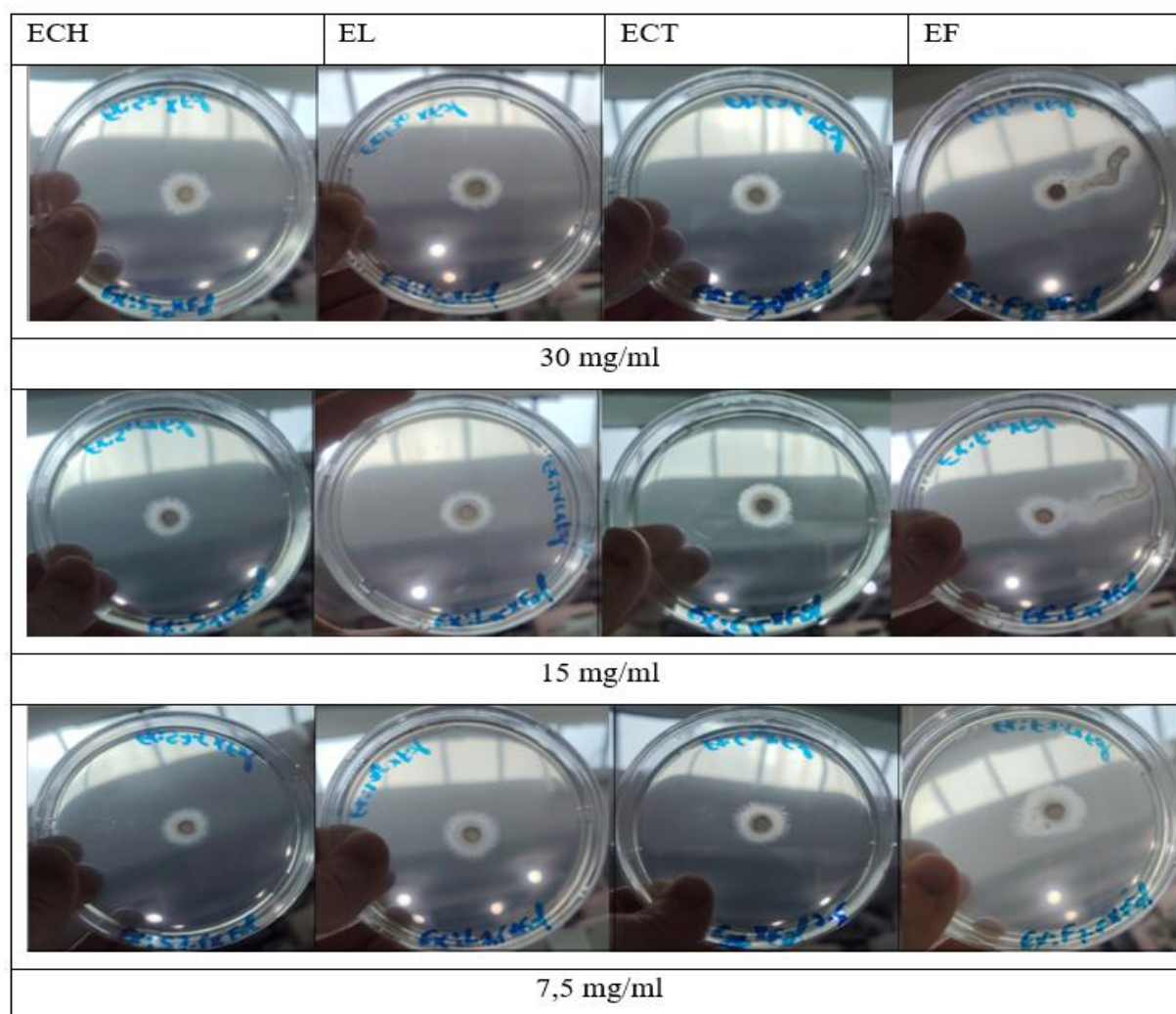
Témoin positif (+)



Témoin négatif (-)

## Annexes

**Annexe 3 :** Diamètre de croissance mycélienne vis-à-vis les extraits de ECH, EL, ECT et EF.



**Annexe 4 :** Lecteur de microplaques Multimode PerkinElmer utilisé pour la lecture des absorbances



## Annexes

**Annexe 5 :** Bain à ultrasons numérique utilisé pour dissoudre les extraits methanoliques.



**Annexe 6 :** Autoclave utilisé pour stériliser le milieu de culture





## Annexes

---

Annexe 7 : Hotte à flux laminaire



Annexe 8 : les huiles des graines de chia, fenouil, citrouille et lin



# Résumés

## Résumé

Cette étude a eu pour but d'étudier les activités biologiques et la composition biochimiques des graines des quatre espèces végétales d'intérêt : *Linum usitatissimum* (lin), *Cucurbita pepo* (citrouille), *Salvia hispanica* (chia) et *Foeniculum vulgare* (fenouil). Ces espèces sont riches en métabolites secondaires, telque les polyphénols et les flavonoïdes.

Des analyses quantitatives ont été réalisées sur les huiles et les extraits méthanoliques des différentes graines ont été réalisées pour évaluer leur teneur en composés bioactifs (polyphénols et flavonoïdes), Les tests sont basés sur l'activité antioxydante (DPPH, FRAP), l'inhibition enzymatique (acétylcholinestérase et l'  $\alpha$ -amylase), le potentiel photoprotecteur (SPF) ainsi que l'activité antifongique contre *Fusarium sp.*

L'activité antioxydante a été évaluée par deux tests principaux : DPPH et FRAP. Les résultats montrent que : l'extrait de citrouille a une bonne activité antiradicalaire DPPH ( $7,73 \pm 0,42 \mu\text{g/ml}$ ) ; l'extrait de fenouil a un bon pouvoir réducteur FRAP ( $14,86 \pm 0,37 \mu\text{g/ml}$ ). L'inhibition enzymatique a révélé que l'extrait de graine de citrouille possède une forte capacité à inhiber l'acétylcholinestérase ( $95,28 \pm 0,86\%$ ) et l'inhibition de l'  $\alpha$ -amylase par les graines de cetrouille est excellente ( $111,60 \pm 5,59 \mu\text{g/ml}$ ). Le test de photoprotection a démontré une capacité SPF notable pour l'huile de fenouil ( $28,93 \pm 0,17$ ). Concernant l'activité antifongique, l'huile de fenouil a montré une inhibition significative de la croissance de *Fusarium sp* avec un diamètre de croissance  $0,77 \pm 0,06$  (cm). Les analyses biochimiques ont confirmé la richesse de ces plantes en composées phénoliques, en flavonoïdes.

En conclusion, cette étude confirme l'évidence de la diversité biochimique et les potentialités thérapeutiques importantes des quatre espèces étudiées. Ce qui traduire leur valeur dans le domaine médicinal, alimentaire et cosmétique. La variation des activités observées est directement liée aux compositions spécifiques des extraits et huiles de chaque plante. En perspective, des compléments à base de graines de citrouille pourraient être utilisés pour aider à traiter la maladie d'Alzheimer, et ceux à base de graines de chia pour le diabète de type 2. De plus, les extraits de fenouil peuvent être utilisés pour produire des fongicides naturels.

**Mots clés :** *Linum usitatissimum*, *Cucurbita pepo*, *Salvia hispanica*, *Foeniculum vulgare*, les métabolites secondaires, les flavonoïdes, les polyphénols, l'acétylcholinestérase, antifongique, SPF, l'alpha-amylase, les antioxydants.

## Abstract

This study aimed to investigate the biological activities and biochemical composition of the seeds of four plant species of interest: *Linum usitatissimum* (flax), *Cucurbita pepo* (pumpkin), *Salvia hispanica* (chia), and *Foeniculum vulgare* (fennel). These species are known for their richness in secondary metabolites, such as polyphenols and flavonoids.

Quantitative analyses were performed on both the oils and methanolic extracts of the seeds to assess their content of bioactive compounds (polyphenols and flavonoids). Several assays were conducted to evaluate their antioxidant activity (DPPH, FRAP), enzymatic inhibition potential (acetylcholinesterase and alpha-amylase), photoprotective potential (SPF), and antifungal activity against *Fusarium* species.

Antioxidant activity was assessed using two main tests: DPPH and FRAP. Results revealed that the pumpkin extract exhibited notable DPPH radical scavenging activity ( $7.73 \pm 0.42 \mu\text{g/ml}$ ), while the fennel extract showed a strong reducing power in the FRAP assay ( $14.86 \pm 0.37 \mu\text{g/ml}$ ). Enzyme inhibition tests demonstrated that the pumpkin seed extract had a strong ability to inhibit acetylcholinesterase ( $95.28 \pm 0.86\%$ ), while pumpkin seeds exhibited excellent alpha-amylase inhibitory activity ( $111,60 \pm 5,59 \mu\text{g/ml}$ ). The photoprotective test showed a significant SPF value for fennel oil ( $28.93 \pm 0.17$ ). Regarding antifungal activity, fennel oil significantly inhibited the growth of *Fusarium* species, with a growth diameter of  $0.77 \pm 0.06$  (cm). Biochemical analyses confirmed the richness of these plants in phenolic compounds, flavonoids.

In conclusion, this study highlights the biochemical diversity and therapeutic potential of the four plant species investigated. These findings underscore their value in medicinal, nutritional, and cosmetic applications. The variation in biological activities observed is directly linked to the specific composition of the extracts and oils from each plant. As a perspective, supplements made from pumpkin seeds could be used to help manage Alzheimer's disease, while those made from chia seeds show promise for type 2 diabetes. In addition, fennel extracts can be used to produce natural fungicides.

**Keywords:** *Linum usitatissimum*, *Cucurbita pepo*, *Salvia hispanica*, *Foeniculum vulgare*, secondary metabolites, flavonoids, polyphenols, acetylcholinesterase, antifungal, SPF, alpha-amylase, antioxidants.



## الملخص

هدف هذه الدراسة هو تقييم الأنشطة البيولوجية والتركيب البيوكيميائي لبذور أربع أنواع نباتية ذات أهمية طبية وغذائية، وهي: *Linum usitatissimum* (الكتان)، *Cucurbita pepo* (اليقطين)، *Salvia hispanica* (الشيا)، و *Foeniculum vulgare* (الشمر). تُعرف هذه الأنواع بغناها بالعديد من المركبات الثانوية النشطة بيولوجيًا، مثل البوليفينولات والفلافونويدات.

أُجريت تحاليل كمية على الزيوت والمستخلصات الميثانولية للبذور بهدف تقييم محتواها من المركبات النشطة بيولوجيًا (الفلافونويدات والبوليفينولات). شملت التحاليل اختبارات النشاط المضاد للأكسدة (باستخدام اختبار DPPH و FRAP)، وتنشيط الإنزيمات (أسيثيل كولين إستيراز وألفا أميليز)، والقدرة على الحماية من الأشعة فوق البنفسجية (SPF)، بالإضافة إلى النشاط المضاد للفطريات ضد سلالة *Fusarium sp.*

أظهر النشاط المضاد للأكسدة نتائج واعدة باستخدام اختبارين رئيسيين:

- حيث أظهر مستخلص بذور اليقطين نشاطاً قوياً في مقاومة الجذور الحرة (DPPH  $7.73 \pm 0.42$ ) ميكروغرام/مل.
- كما أظهر مستخلص بذور الشمر قوة اختزال عالية في اختبار (FRAP  $14.86 \pm 0.37$ ) ميكروغرام/مل.

أما فيما يخص تنشيط الإنزيمات، فقد أظهر مستخلص اليقطين قدرة قوية على تنشيط إنزيم الأسيتيل كولين إستيراز ( $95.28 \pm 0.86\%$ )، في حين أظهرت بذور اليقطين تنشيطاً فعالاً لإنزيم ألفا أميليز ( $5.59 \pm 111.60$ ) ميكروغرام/مل. وفي اختبار الحماية من أشعة الشمس، أظهرت زيت بذور الشمر قدرة جيدة على امتصاص الأشعة فوق البنفسجية (SPF =  $28.93 \pm 0.17$ ).

أما بالنسبة للنشاط المضاد للفطريات، فقد أظهر مستخلص الشمر تنشيطاً ملحوظاً لنمو فطريات *Fusarium sp.* بقطر نمو  $0.77 \pm 0.06$  (سم). أكدت التحاليل البيوكيميائية أن هذه النباتات غنية بمركبات الفينولات، والفلافونويدات.

وفي الختام، تثبت هذه الدراسة التنوع البيوكيميائي العالي لتلك الأنواع النباتية، إضافة إلى إمكاناتها العلاجية البارزة، ما يجعلها ذات قيمة كبيرة في المجالات الطبية، والغذائية، والتجميلية. ويُعزى الاختلاف في الأنشطة البيولوجية بين المستخلصات والزيوت إلى الاختلاف في التركيب الكيميائي لكل نبتة.

وفي إطار التطلعات المستقبلية، يمكن استخدام المكملات الغذائية المصنوعة من بذور اليقطين للمساعدة في علاج مرض الزهايمر، والمكملات المستخلصة من بذور الشيا للتحكم في داء السكري من النوع الثاني. كما يمكن استغلال مستخلصات الشمر في إنتاج مبيدات فطرية طبيعية.

## الكلمات المفتاحية:

*Linum usitatissimum*، *Cucurbita pepo*، *Salvia hispanica*، *Foeniculum vulgare*، المركبات الثانوية، الفلافونويدات، البوليفينولات، الأسيتيل كولين إستيراز، مضاد للفطريات، SPF، ألفا أميليز، مضادات الأكسدة

Année universitaire : 2024-2025

Présenté par : Gourari Nour el houda  
Beleghrib Ouarda

**Intitulé : Etude comparative entre différentes espèces de graines végétales (extrait brute et l'huile) : effet antioxydant, propriétés inhibitrices des enzymes et activité antifongique**

**Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master  
Spécialité : Biochimie**

### Résumé

Cette étude a eu pour but d'étudier les activités biologiques et de la composition biochimiques des graines des quatre espèces végétales d'intérêt : *Linum usitatissimum* (lin), *Cucurbita pepo* (citrouille), *Salvia hispanica* (chia) et *Foeniculum vulgare* (fenouil). Ces espèces sont riches en métabolites secondaires, telque les polyphénols et les flavonoïdes.

Des analyses quantitatives ont été réalisées sur les huiles et les extraits méthanoliques des différentes graines ont été réalisées pour évaluer leur teneur en composés bioactifs (polyphénols et flavonoïdes), Les tests sont basés sur l'activité antioxydante (DPPH, FRAP), l'inhibition enzymatique (acétylcholinestérase et alpha-amylase), le potentiel photoprotecteur (SPF) ainsi que l'activité antifongique contre *Fusarium sp.*

L'activité antioxydante a été évaluée par deux tests principaux : DPPH et FRAP. Les résultats montrent que : l'extrait de citrouille a une bonne activité antiradicalaire DPPH ( $7,73 \pm 0,42 \mu\text{g/ml}$ ) ; l'extrait de fenouil a un bon pouvoir réducteur FRAP ( $14,86 \pm 0,37 \mu\text{g/ml}$ ). L'inhibition enzymatique a révélé que l'extrait de graine de citrouille possède une forte capacité à inhiber l'acétylcholinestérase ( $95,28 \pm 0,86\%$ ) et l'inhibition de l'alpha-amylase par les graines de cetruille est excellente ( $111,60 \pm 5,59 \mu\text{g/ml}$ ). Le test de photoprotection a démontré une capacité SPF notable pour l'huile de fenouil ( $28,93 \pm 0,17$ ). Concernant l'activité antifongique, l'huile de fenouil a montré une inhibition significative de la croissance de *Fusarium sp* avec un diamètre de croissance  $0,77 \pm 0,06$  (cm). Les analyses biochimiques ont confirmé la richesse de ces plantes en composées phénoliques, en flavonoïdes, en tocophérols et en caroténoïdes. En conclusion, cette étude confirme l'évidence de la diversité biochimique et les potentialités thérapeutiques importantes des quatre espèces étudiées. Ce qui traduire leur valeur dans les domaines médicinal, alimentaire et cosmétique. La variation des activités observées est directement liée aux compositions spécifiques des extraits et huiles de chaque plante.

**Mots-clés :** *Linum usitatissimum*, *Cucurbita pepo*, *Salvia hispanica*, *Foeniculum vulgare*, métabolites secondai  
flavonoïdes, polyphénols, l'acétylcholinestérase, antifongique, SPF, alpha-amylase, antioxydants.

**Laboratoires de recherche :** laboratoire de recherche (Centre de Recherche en Biotechnologie-CRBt).

**Président du jury :** Dr KHEDARA A - UFM Constantine 1  
**Encadrante:** Dr KHATTABI L - CRBt  
**Examinatrice:** Dr MEDOUKALI I - UFM Constantine 1