

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Université Aïn Témouchent-Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département Science de La Nature et de La Vie



Projet de fin d'études
pour l'obtention du Diplôme de Master en Science Biologique
Option : Biochimie
Filière : Sciences Biologiques

Thème

Évaluation comparative des activités biologiques des huiles végétales et essentielles *d'Opuntia ficus indica (Cactaceae)*

Soutenu le : 29-06-2025

Présenté Par :

BARKA HICHEM.

BENZEMRA OUSSAMA.

Devant le jury composé de

Dr. YAZIT Mohammed	MCA	Président	UAT.B.B (Ain Temouchent)
Dr. BOUCHACHIA Souad	MCB	Examinatrice	UAT.B.B (Ain Temouchent)
Dr. BENNABI Farid	MCA	Encadrant	UAT.B.B (Ain Temouchent)

Année Universitaire : 2024/2025



Remerciement

Ce travail n'aurait jamais vu le jour sans la volonté **de DIEU**, qui nous a Offert santé, force, patience et volonté jusqu'au dernier moment. Nous Remercions **DIEU** pour ça et pour tout le reste.

Ce travail n'aurait jamais vu le jour sans la volonté **de Dieu**, qui nous a offert santé, force, patience et détermination jusqu'à son aboutissement. Nous Lui exprimons notre gratitude pour ces bienfaits et pour tout le reste.

À notre directeur de mémoire

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à **Dr. BENNABI Farid** pour son accompagnement précieux tout au long de ce travail. Ses conseils avisés, ses retours constructifs sur la méthodologie et sa constante disponibilité ont été déterminants dans la réussite de nos travaux. Son expertise et sa rigueur ont grandement enrichi notre réflexion, faisant de cette expérience un véritable apprentissage intellectuel.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'évaluer ce travail.

Nous exprimons notre reconnaissance à **Dr. YAZIT Mohammed**, président du jury, pour avoir accepté d'assurer cette fonction avec bienveillance.

Nous adressons également nos vifs remerciements à **Dr. BOUCHACHIA Souad** pour avoir accepté d'évaluer ce modeste travail.

Nos sincères remerciements vont aussi à toute l'équipe du laboratoire pour leur accueil chaleureux, leur soutien technique et leur aide précieuse tout au long de la période expérimentale.

À notre promotion 2024-2025

C'est avec une immense reconnaissance que nous rendons hommage à l'esprit de collaboration et d'entraide qui a animé notre promotion cette année. Chacun d'entre vous a contribué à créer un environnement stimulant, marqué par des échanges enrichissants, des débats passionnants et une passion commune pour le savoir.

Les moments partagés – qu'il s'agisse des discussions animées ou simplement des échanges informels entre deux cours – ont transformé ce parcours en une aventure aussi exigeante qu'inoubliable. C'est cette synergie collective qui a su faire de nos défis des opportunités et de nos différences des forces complémentaires.



Dédicaces

Je dédie ce travail à :

À mes chers parents, qui ont tout sacrifié pour moi, éclairant mon chemin et me soutenant sans relâche.

À ma famille bien-aimée, mon refuge et ma source de force, merci pour votre amour inconditionnel.

À ma chère sœur Douaa, ma compagne de route, merci d'être mon soutien dans les moments difficiles.

À celui qui m'a appris que les défis ne sont que le début du chemin,
À celui qui a semé en moi l'esprit de compétition et de détermination,

À mon entraîneur respecté, Monsieur Belkheir Yahia,

Je dédie ce modeste effort,

Car c'est toi qui as toujours été derrière moi, aiguisant ma motivation,

Me rappelant que les champions ne sont pas faits d'or,

Mais de sueur et d'une volonté inflexible.

Merci d'avoir été bien plus qu'un entraîneur,

Un guide, un frère et une force motrice qui m'a poussé à donner le meilleur de moi-même.

Que Dieu te récompense pour chaque moment de patience et de conseils,

Et place tes efforts dans la balance de tes bonnes actions au Jour de la résurrection.

À mon cher collègue Oussama, partenaire d'efforts et de succès, ton soutien et ta collaboration ont été d'une valeur inestimable.

À tous ceux qui ont contribué au succès de mon parcours académique, par une parole bienveillante ou un précieux conseil :

Je prie Dieu de vous récompenser et de placer ce travail dans la balance de vos bonnes actions.

Je ne serais pas arrivé là où je suis sans votre soutien. Acceptez mes plus sincères expressions de gratitude et de reconnaissance.

HICHEM



Dédicaces

Premièrement, je rends grâce à Dieu Tout-Puissant, qui m'a ouvert les portes du savoir et de la connaissance et m'a aidé à accomplir ce travail.

Je dédie ce modeste travail à :

À mon père et à ma mère, qui m'ont toujours encouragé. Sans eux, je ne serais pas arrivé là où je suis aujourd'hui. Je les remercie du fond du cœur et prie Dieu de les préserver, de leur accorder santé, longue vie et bonheur.

À mes sœurs Sondous, Rihab et Hadil, qui ont toujours été à mes côtés. Merci pour votre soutien et votre confiance en moi ; je vous suis infiniment reconnaissant.

À mon ami dans ce travail, Hichem, qui m'a accompagné tout au long de ce parcours. Nous avons partagé de beaux souvenirs durant ma vie académique. Je lui souhaite bonheur et succès dans sa vie.

OUSSAMA



Table des matières

Listes des figures	
Listes des tableaux	
Listes des abréviations	
Introduction générale	2
I.1. Généralités sur le figuier de barbarie	6
I.2. Origine et histoire	6
I.3. Nomenclatures et appellations	7
I.4. Distribution géographique	8
I.5. Taxonomie	9
I.5.1 Famille des <i>cactaceae</i>	10
I.5.2 Genre <i>opuntia</i>	10
I.6. Description botanique	10
I.6.1 Système racinaire	11
I.6.2 Le cladode	12
I.6.3 Le fruit	12
I.6.4 Les fleurs	13
I.7. Physiologie de la plante	15
I.8. Usages traditionnels	16
I.8.1 Usage médicinale	16
I.8.2 Usage Alimentaire	17
I.8.3 Usage fourrager	20
I.8.4 Usage cosmétique	21
II.1. Généralité sur les huiles végétales	23
II.1.1 Définition	23
II.1.2 Composition des huiles végétales	24
II.1.2.1 Les composés majoritaires d'une huile végétale	25
II.1.2.2 Les composés minoritaires d'une huile végétale	26
II.2. Les procédés d'extraction des l'huile végétales	27
II.2.1 Méthodes conventionnelles d'extraction des huiles végétales	27
II.2.2 Méthodes innovantes d'extraction des huiles végétales	30
II.3. Propriétés chimiques des huiles végétales	31
II.4. Composition chimique de l'huile végétale de figue de Barbarie	32
II.4.1 Composition en acides gras	32
II.4.2 Teneur en phytostérols et en tocophérols	34
II.4.3 Teneur en polyphénols, flavonoïdes, caroténoïdes et chlorophylle de l'huile de pépins de figue de Barbarie	36

III. Activités biologiques des huiles végétale.....	37
III.1 Activité antioxydants.....	38
III.1.1 Stress oxydatif.....	38
III.1.2 Antioxydants.....	39
III.2 Activité antimicrobienne.....	41
III.2.1 Processus d'action antimicrobiennes.....	42
III.2.2 Activité antimicrobienne de l'huile végétale de figue de Barbarie.....	42
III.3 Activité anti-inflammatoire.....	42
III.3.1 Inflammation.....	42
III.3.2 Anti-inflammatoires.....	43
IV. Huiles essentielles.....	46
IV.1 Définition.....	46
IV.2 Les procédés d'extraction des huiles essentielles.....	47
IV.2.1 Méthodes conventionnelles.....	47
IV.2.1.1 Hydrodistillation.....	47
IV.2.1.2 Expression à froid.....	47
IV.2.1.3 Extraction par Entraînement à la vapeur d'eau.....	48
IV.2.2 Méthodes innovantes.....	49
IV.2.2.1 Extraction assistée aux ultrasons.....	49
IV.3 Composition chimique des huiles essentielles.....	49
IV.4 Les activités biologiques des huiles essentielles.....	51
IV.4.1 Activité antioxydante.....	51
IV.4.2 Activité antimicrobienne.....	51
IV.4.3 Activité anti-inflammatoire.....	52
❖ Partie II : Matériel et méthodes.....	53
Objectifs de travail.....	54
II.1. Préparation des huiles Essentielle.....	56
II.1.1 Matériel végétal.....	56
II.2. Méthodes d'Extraction de l'huile végétale.....	56
II.2.1. Montage de Soxhlet.....	56
II.3 Evaluation des activités biologiques.....	57
II.3.1 Evaluation de l'activité anti-radicalaire par la méthode du DPPH.....	57
II.3.1.1 Test DPPH.....	57
II.3.1.2 Mode opératoire.....	58
II.3.1.3 Expression des résultats.....	60
II.3.2 Evaluation de l'activité antimicrobienne.....	60
II.3.2.1 Souches microbiennes testées.....	60

II.3.2.2 Préparation des échantillons	62
II.3.2.3 Préparation de l'inoculum	63
II.3.2.4 Evaluation l'activité antimicrobienne par la méthode de Diffusion sur gélose.....	64
II.3.2.5 Lecture des résultats	65
II.3.3 Evaluation de l'activité anti-inflammatoire	66
II.3.3.1 Principe	66
II.3.3.2 Préparation de la suspension érythrocytaire	66
II.3.3.3 Test de stabilisation membranaire par la chaleur	66
II.3.3.4 Test d'hémolyse	67
❖ Partie III : Résultats et discussion	69
III. Les activités biologiques	70
III.1 Évaluation de l'activité antioxydante	70
III.2 Évaluation de l'activité antimicrobienne	73
III.3 Évaluation de l'activité anti-inflammatoire	76
III.3.1 Test de stabilisation membranaire par chaleur	77
III.3.2 Test d'hémolyse	77
Conclusion.....	80
Références	83
Annexes.....	98



Liste des figures

Listes des figures

Figure 1 : Représentation de l'emblème de Tenochtitlan tiré du Codex Mendoza	7
Figure 2 : Répartition géographique mondiale d' <i>Opuntia ficus indica</i>	8
Figure 3 : Représentation des principaux organes de <i>O. ficus indica</i>	11
Figure 4 : Les fleurs. Figure 5 : Les Fruits.	14
Figure 6 : Les Cladodes.	14
Figure 7 : Représentation du métabolisme acide crassulacéen (CAM)	15
Figure 8 : Propriétés médicinales de l' <i>Ofi</i>	17
Figure 9 : Composition chimique du figuier de Barbarie (en % de matière fraîche) et constitution du fruit en pourcentage du poids du fruit (pf)	18
Figure 10 : Images de certains produits issus du Figuier de Barbarie	19
Figure 11 : Composition du cladode proximal en (%)	19
Figure 12 : Raquettes coupées pour la consommation par le bétail	20
Figure 13 : Structure général d'un triglycéride	23
Figure 14 : Constituants des huiles végétales	24
Figure 15 : Réaction de formation des triglycérides	25
Figure 16 : extracteur de Soxhlet	29
Figure 17 : Schéma de principe de l'extraction par macération : (a) agitation intermittente ou continue ; (b) centrifugation et/ou filtration	30
Figure 18 : Diagramme de phase du CO ₂	30
Figure 19 : Diagramme schématique de l'extraction par fluide supercritique	31
Figure 20 : la structure chimique de : a) campestérol, b) β -sitostérol et c) γ -tocophérol.	35
Figure 21 : Schéma des antioxydants endogènes et exogènes. SOD, superoxyde dismutase ; CAT, catalase ; GPX, glutathion peroxydase ; GSR, glutathion réductase ; GST, glutathion transférase	40
Figure 22 : Appareillage utilisé pour l'hydrodistillation de l'huile essentielle.	47
Figure 23 : Montage d'extraction par l'expression à froid	48
Figure 24 : Entraînement à la vapeur d'eau	48
Figure 25 : Montage d'extraction assistée aux ultrason	49
Figure 26 : Caractéristiques structurales des terpènes volatils et des terpénoïdes dans les huiles essentielles.....	50
Figure 27 : Exemples de composants HE typiques classés par famille structurale	50
Figure 28 : Représentation schématique de la paroi cellulaire bactérienne Gram-positive et Gram-négative	51
Figure 29 : Mécanisme antibactérien des huiles essentielles (HE).	52
Figure 30 : Schéma récapitulatif du protocole expérimental.....	55
Figure 31 : L'huile essentielle.....	56
Figure 32 : région d'achtée.....	56
Figure 33 : La structure chimique d'un radical 1,1-diphényl-2-picrylhydrazil	57
Figure 34 : Mécanisme de réaction de 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl (DPPH).....	58
Figure 35 : Préparation de La solution mère (SM).	59
Figure 36 : Méthode de diffusion sur gélose	64
Figure 37 : préparation de la suspension érythrocytaire	68
Figure 38 : Variation du pourcentage de l'activité antioxydante en fonction de la concentration d'huile essentielle, huile végétale et acide ascorbique.....	72
Figure 39 : Représentation graphique montre la comparaison entre les résultats de l'activité antioxydante d'huile végétale et d'huile essentielle avec l'A. Ascorbique de la plante <i>Opuntia ficus indica</i>	73

Figure 40 : Représentation graphique de l'activité antibactérienne et l'activité antifongique (<i>Candida albicans</i>) de l'huile essentielle et de l'huile végétale de la plante d' <i>Opuntia ficus indica</i>	76
Figure 41 : Résultats de l'effet de l'huile essentielle et huile végétale contre la stabilisation membranaire induite	77
Figure 42 : Résultats de l'effet de l'huile essentielle et huile végétale dans la solution hypotonique....	78
Figure 43 : Préparation de milieux de culture (MH) et (BMH).....	99



Liste des tableaux

Listes des tableaux

Tableau I : Représentant les AG les plus abondants dans les huiles végétales.	26
Tableau II : Composition en acides gras principaux de l'huile de pépins de figue de barbarie	33
Tableau III : Composition en phytostérols et en vitamine E (%) de l'huile de pépins de figue de barbaeie.....	34
Tableau IV : Concentrations antioxydantes des huiles de graines de <i>Pistacia lentiscus L. (PL)</i> , <i>Opuntia ficus- indica (L.) Mill. (OFI)</i> et <i>Argania spinosa L. (AS)</i>	36
Tableau V : Liste des espèces réactives de l'oxygène, de l'azote et du soufre	39
Tableau VI : les différentes souches bactériennes étudiées.	61
Tableau VII : Les diamètres des zones d'inhibition (DZI) de la croissance microbienne	65
Tableau VIII : Valeurs des IC ₅₀ d'huile végétale, d'huile essentielle et A. Ascorbique.	72



Liste des abréviations

Listes des abréviations

AG : Acides gras.

AGI : Acides gras insaturés.

AGS : Acides gras saturés.

AINS : Anti-inflammatoires non stéroïdiens.

AIS : Anti-inflammatoires stéroïdiens.

ARN : Les espèces réactives de l'azote.

AS : *Arganias pinosa*.

ATCC : American type culture collection

BMH : Bouillon Muller-Hinton.

CAM : Le métabolisme acide crassulacéen.

C. albicans : *Candida albicans*.

CH₃ : Groupe méthyle.

CMR : Cancérigène, Mutagène, Reprotoxique.

Cm : Centimètre.

COX-1 : Enzymes cyclooxygénases 1.

COX-2 : Enzymes cyclooxygénases 2.

CO₂ : Dioxyde de carbone.

C16:0 : Les acides gras saturés palmitique.

C18:0 : Les acides gras saturés stéarique.

C18:1 : Les acides gras insaturés oléique.

C18:2 : Les acides gras insaturés linoléique.

C18:3 : Les acides gras insaturés linoléinique.

DO : Densité optique.

DPPH : 2,2-diphényl-2-picryl-hydrayl.

DZI : Diamètre de zone d'inhibition.

E. coli : *Escherichia coli*.

FAO : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture.

GAE : Equivalent d'acide gallique.

G : Gramme.

HV : Huile végétale.

HE : Huile essentielle.

I.A : Indice d'acide.

I.S : Indice de saponification.

I.I : Indice d'iode.

I.P : Indice de peroxyde.

IC50 : La concentration inhibitrice médiane.

K. pneumoniae : *Klebsiella pneumoniae*.

MH : Gélose Muller-Hinton.

Ofi : *Opuntia ficus indica*.

P. aeruginosa : *Pseudomonas aeruginosa*.

PEPC : Phosphoénolpyruvate carboxylase.

PL : Pistacia lentiscus.

PPSO : Huile de pépins de Figuier de Barbarie..

R-COOH : Les acides carboxyliques.

RubisCO : Ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygénase.

ROS : Les espèces réactives de l'oxygène.

S. aureus : *Staphylococcus aureus*.

SEF : Extraction par fluide supercritique.

TG : Triglycérides.

Résumé

Au cours des dernières années, les recherches se sont penchées sur des alternatives naturelles aux molécules de synthèse. Les extraits végétaux suscitent un intérêt croissant en raison de leur multifonctionnalité et de leur faible toxicité.

L'Opuntia ficus indica (*Ofi*), communément appelée « Figue de Barbarié », est une *Cactaceae* originaire d'Amérique centrale. Elle se caractérise par une adaptation remarquable aux climats arides et semi-arides, comme en Algérie, et représente une ressource sous-exploitée : ses graines, souvent considérées comme des déchets, contiennent une huile végétale riche en composés bioactifs, tandis que les parties aériennes peuvent fournir une huile essentielle aux propriétés volatiles.

Ce travail propose une approche comparative entre l'huile végétale (HV) extraite des graines et une huile essentielle (HE) commerciale de cladodes d'*Opuntia ficus indica*, en ciblant trois activités biologiques clés : antioxydante, antimicrobienne et anti-inflammatoire.

Les résultats obtenus montrent que les huiles végétales à base de la plante d'*Ofi* possèdent une activité Anti-radicalaire permettant la dégradation du DPPH, avec une IC_{50} de 2,7736 mg/ml, contre une IC_{50} de 4,10 mg/ml pour les huiles essentielles d'*Ofi*.

L'évaluation de l'activité antibactérienne et antifongique sur les souches microbiennes testées révèle que les huiles végétales ont une forte activité, contrairement aux huiles essentielles qui ne présentent qu'une faible activité contre la souche bactérienne *Klebsiella pneumoniae* à une concentration de 300 mg/ml.

L'activité anti-inflammatoire in vitro des huiles essentielle et végétale d'*Opuntia ficus-indica* a été évaluée par deux méthodes : la stabilisation membranaire par la chaleur et l'hémolyse, avec le diclofénac comme référence. L'huile végétale (100 mg/mL) a montré une inhibition de 69 % lors de la stabilisation membranaire, contre 50 % pour l'huile essentielle et 89 % pour le diclofénac. En ce qui concerne le test d'hémolyse, les taux d'inhibition étaient respectivement de 41 %, 31 % et 71 %. Ces données indiquent que les deux huiles présentent une activité anti-inflammatoire modérée, l'huile végétale étant globalement plus efficace.

Mots -clés : *Opuntia ficus Indica*, activité antioxydante, l'huile végétale, l'huile essentielle, Activité antimicrobienne, Activité anti-inflammatoire

Abstract

In recent years, research has focused on natural alternatives to synthetic molecules. Plant extract shave garnered increasing interest due to their multi functionality and low toxicity.

Opuntia ficus-indica (*Ofi*), commonly known as « prickly pear », is a *Cactaceae* species native to Central America. It is characterized by remarkable adaptation to arid and semi-arid climates, such as in Algeria, and represents an underutilized resource: its seeds, often considered waste, contain a vegetable oil rich in bioactive compounds, while the aerial parts can yield an essential oil with volatile properties.

This study presents a comparative analysis between the vegetable oil (VO) extracted from the seeds and a commercial essential oil (EO) from *Opuntia ficus indica* cladodes, targeting three key biological activities : antioxidant and antimicrobial.

The obtained results show that OFI-based vegetable oils possess radical-scavenging activity, degrading DPPH with an IC_{50} of 2.7736 mg/mL, compared to an IC_{50} of 4.10 mg/mL for *Ofi* essential oils.

The evaluation of antibacterial and antifungal activity on the tested microbial strains reveals that fixed oils exhibit strong activity, unlike essential oils, which show only weak activity against the bacterial strain *Klebsiella pneumoniae* at a concentration of 300 mg/mL.

In vitro anti-inflammatory activity of *Opuntia ficus-indica* essential and vegetable oils was evaluated using two methods: heat-induced membrane stabilization and hemolysis, with diclofenac serving as the reference anti-inflammatory agent.

At a concentration of 100 mg/mL, the vegetable oil exhibited 69% inhibition in the membrane stabilization assay, compared to 50% for the essential oil and 89% for diclofenac. In the hemolysis assay, the inhibition rates were 41%, 31%, and 71%, respectively. These results indicate that both oils possess moderate anti-inflammatory activity, with the vegetable oil demonstrating overall greater efficacy.

Keywords : *Opuntia ficus indica*, antioxidant activity, vegetable oil, essential oil, antimicrobial activity, anti-inflammatory activity.

ملخص

في السنوات الأخيرة، تركزت الأبحاث على إيجاد بدائل طبيعية للجزيئات الاصطناعية. وقد أثارَت المستخلصات النباتية اهتماماً متزايداً نظراً لتعدد وظائفها وانخفاض سميتها.

تُعد *Opuntia ficus indica* (Ofi)، المعروفة باسم "التين الشوكي"، من النباتات التابعة لفصيلة الصباريات، وموطنها الأصلي هو أمريكا الوسطى. وتتميز هذه النبتة بقدرتها العالية على التكيف مع المناخات الجافة وشبه الجافة، كما هو الحال في الجزائر، وتُعد مورداً غير مستغل بشكل كافٍ؛ إذ تحتوي بذورها، التي غالباً ما تُعتبر نفايات، على زيت نباتي غني بالمركبات البيولوجية الفعالة، بينما يمكن للأجزاء الهوائية أن توفر زيتاً أساسياً يتميز بخصائص طيارة.

يقترح هذا العمل مقارنة مقارنة بين الزيت النباتي (HV) المستخرج من البذور وزيت أساسي (HE) تجاري مستخرج من ألواح *Opuntia ficus indica*، مع التركيز على ثلاث نشاطات بيولوجية رئيسية: مضادة للأوكسدة ومضادة للميكروبات. تُظهر النتائج أن الزيوت النباتية المستخلصة من نبتة OFI تملك نشاطاً مضاداً للجذور الحرة يسمح بتفكك جذر الـ DPPH، حيث بلغت قيمة IC_{50} حوالي 2.7736 ملغ/مل، مقابل IC_{50} قدرها 4.10 ملغ/مل لزيوت OFI الأساسية.

أما تقييم النشاط المضاد للبكتيريا والفطريات على السلالات الميكروبية المدروسة، فقد أظهر أن الزيوت الثابتة تتمتع بنشاط قوي، في حين أن الزيوت الأساسية لم تُظهر سوى نشاط ضعيف ضد السلالة البكتيرية *Klebsiellapneumoniae* بتركيز 300 ملغ/مل.

تم تقييم النشاط المضاد للالتهاب *in vitro* للزيت *Opuntia ficus-indica* النباتي والزيت العطري باستخدام طريقتين: تثبيت الغشاء بفعل الحرارة والانحلال الدموي، مع استخدام الديكلوفيناك كعامل مرجعي مضاد للالتهاب.

عند تركيز 100 ملغ/مل، أظهر الزيت النباتي نسبة تثبيط بلغت 69% في اختبار تثبيت الغشاء، مقارنة بـ 50% للزيت العطري و 89% للديكلوفيناك. أما في اختبار الانحلال الدموي، فقد بلغت نسب التثبيط 41%، 31%، و 71% على التوالي. تشير هذه النتائج إلى أن كلا الزيتين يمتلكان نشاطاً مضاداً للالتهاب بدرجة متوسطة، مع فعالية أعلى بشكل عام للزيت النباتي.

الكلمات المفتاحية: النشاط المضاد للأوكسدة، الزيت النباتي، الزيت الأساسي، النشاط المضاد للميكروبات، التين الشوكي، النشاط مضاد للالتهابات.



Introduction générale

Introduction générale

Contexte Les plantes médicinales sont restées sous les feux de la rampe de la communauté scientifique en raison de leur polyvalence, conjuguée à la demande croissante du monde pour des produits de santé naturels, sûrs et efficaces.

De plus, leurs applications dans les industries alimentaires, pharmaceutique, cosmétique et agricole, entre autres, ont consolidé leur popularité.

Pendant des siècles, les plantes médicinales ont été la seule option pour prévenir et traiter les maladies humaines physiques et même psychiques, ce qui témoigne d'une conscience précoce des propriétés thérapeutiques des végétaux (**Bolouri et al., 2022 ; Manisha et al., 2025**).

Ceci est confirmé par l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Malgré l'essor de la production de médicaments de synthèse après la révolution industrielle, près de la population mondiale utilise la médecine traditionnelle, principalement à base de plantes médicinales, pour des soins de santé primaires, non plus par manque d'accès aux médicaments prescrits par la médecine moderne, mais aussi parce que ces plantes ont souvent une réelle efficacité (**Bhat et al., 2021**).

Dans ce contexte, l'Algérie, avec sa flore méditerranéenne et saharienne d'une exceptionnelle diversité, représente un réservoir encore peu exploré dans le domaine des substances naturelles.

Le Figuier de Barbarie (*Opuntia ficus indica*) en est un exemple typique de cette fortune végétale encore délaissée localement (**Boutaghane, 2013**).

Ce cactus est une plante dicotylédone de la catégorie des Angiospermes, appartenant à la famille des *Cactaceae* et au genre *Opuntia*, d'origine mexicaine, poussant de préférence dans des zones à climats arides et semi-arides (**Manisha et al., 2025**).

En ce qui concerne ses fruits délicieux, les graines de ces derniers, bien que considérées comme des déchets, ne manquent pas d'intérêt en raison de leur contenu en huile végétale, riche en acides gras essentiels, vitamines, stérols...

Introduction générale

Dans ce manuscrit, nous proposons une approche comparative entre l'huile végétale extraite des graines et une huile essentielle commerciale de cladodes d'*Opuntia ficus indica*, en ciblant trois activités biologiques clés : antioxydante , antimicrobienne et anti-inflammatoire.

Le contenu de ce travail est présenté en deux parties. La première partie comprend trois chapitres consacrés à une étude bibliographique détaillée :

- Le premier chapitre : aborde divers aspects liés à *Opuntia ficus indica*, en mettant en lumière ses caractéristiques générales, notamment sa taxonomie, sa distribution géographique et ses usages traditionnels.
- Le second chapitre : décrit les huiles végétales, en définissant leur nature, les méthodes couramment utilisées pour leur extraction, ainsi que la composition chimique des huiles végétales extraites d'*Opuntia ficus indica*.
- Le troisième chapitre : est consacré aux activités biologiques des huiles végétales, en mettant l'accent sur leurs effets antioxydants, antimicrobiens et anti-inflammatoires
- Le quatrième chapitre porte sur les huiles essentielles, notamment leur définition, leur composition chimique, les procédés d'extraction couramment employés, ainsi que les principales propriétés biologiques.

La deuxième partie est dédiée à la présentation et à la description de la partie expérimentale. Elle est divisée en deux sections : l'une présente les méthodes et techniques utilisées pour la réalisation de ce travail, et l'autre est réservée à la discussion des résultats obtenus.

Enfin, une conclusion générale permettra une synthèse des différents résultats obtenus, suivie d'une analyse critique.



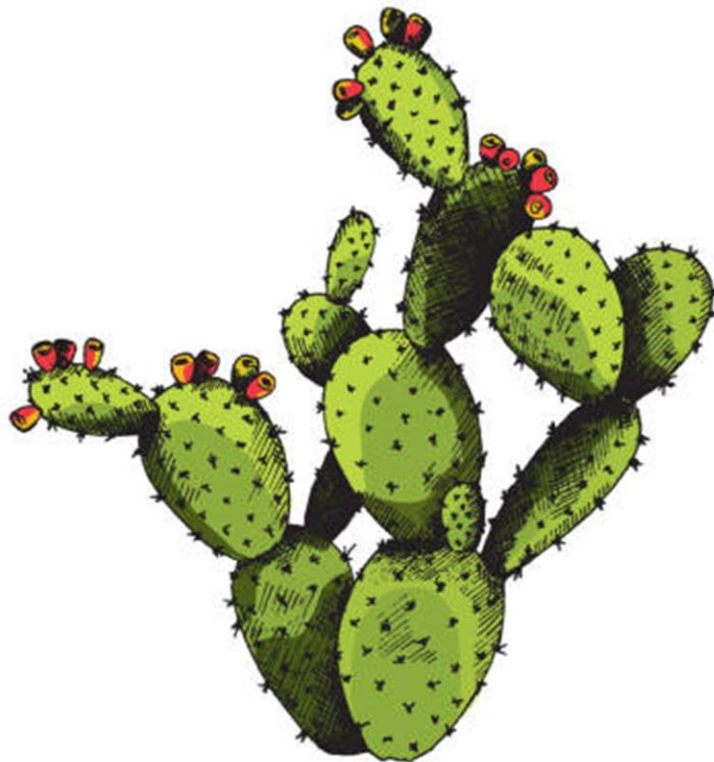
Partie I

Synthèse bibliographique



CHAPITRE I

Généralités sur Figuier de *Barbarie (Opuntia ficus indica)*



I.1. Généralités sur le figuier de barbarie

Pour apprécier la beauté des cactus et des plantes épineuses, nous devons d'abord les comprendre en profondeur. Elles ne sont pas simplement des êtres étranges ou gênants, mais représentent des merveilles naturelles qui reflètent la magnificence de l'adaptation à des environnements hostiles.

Dans leurs habitats d'origine, ces plantes montrent une précision étonnante dans leur conception, où chaque détail s'adapte aux conditions de vie difficiles.

Grâce à leurs formes uniques remplies d'épines, ses raquettes bizarres aux formes inattendues, leurs grandes fleurs qui ravissent les enfants malgré leur courte durée de vie, et leurs fruits parfumés qui demandent des efforts pour être récoltés en raison de leurs épines acérées, la plante Fiquier de Barbarie reste une énigme qui cache de nombreux secrets.

Cette plante, qui appartient à la famille des *Cactacées*, n'est pas simplement une plante désertique capable de résister à la sécheresse, mais un trésor naturel qui mérite d'être étudié et valorisé. Elle recèle encore de nombreux secrets non découverts, ce qui en fait un sujet passionnant pour la recherche scientifique (Fournier, 1954 ; Schweizer, 1997).

I.2. Origine et histoire

L'Opuntia ficus indica appelé communément Fiquier de Barbarie, est l'une des plantes les plus répandues et reconnues dans notre quotidien (Zeghib et al., 2022).

Elle est profondément ancré dans les civilisations mésoaméricaines en particulier la culture Aztèque. Où il occupait une place majeure dans l'économie, la société et la religion. Il figure d'ailleurs sur le blason du Mexique, représenté par un aigle perché sur Fiquier de Barbarie, symbolisant Tenochtitlan, l'ancienne capitale Aztèque.

Le non Tenochtitlan qui signifie «lieu où pousse le Fiquier de Barbarie sur la pierre» témoigne de l'importance symbolique et culturelle de cette plante pour les Aztèques (Carmen Sáenz et al., 2013). (figure 01).



Figure 1 : Représentation de l'emblème de Tenochtitlan tiré du Codex Mendoza (Biar, 2020).

Cette plante, introduire en Espagne après le voyage de Christophe Colomb à la fin de 15^{ème} siècle, et au Nord Et au Sud de l'Afrique et tout au long du bassin méditerranéen au 16^{ème} siècle, ses rapidement adapté aux régions arides (Schweizer, 1997 ; Boutakiout, 2015). Il a marqué les esprits de conquistadors, notamment pour ses fruits grâce à leur propriété anti-scorbutiques, tandisque les espagnols découvraient son potentiel économique grâce à la cochenille, un insecte vivant sur *Ofi* et produisant un colorant rouge très prisé. Aujourd'hui, il est redécouvert pour vertus médicinales, industrielles et écologique, confirmant son statut de plante polyvalente (Schweizer, 1997).

I.3. Nomenclatures et appellations

Il existe plusieurs appellations selon les différentes régions.

Nopal : c'est le nom mexicain de la plante dérivés du mot *Nochtli* en nahuatl, Lange classique des Aztèques.

Le non scientifique de cette plante est *Opuntia ficus indica*. Elle appartient à la famille des *Cactaceae*. La plante peut porter un nom différent selon l'idiomelocal :

En Espagne : outre Nopal, Nopallito, on l'appelle familièrement Nopalcito, Tuna, Ensada, Higos de PalaHigos de Mauro.

Français : nopal, figuier d'Inde, raquette.

Anglais : prickly pear, Indian fig, Barbary-fig, Indian-fig, tuna cactus.

Portugais : abaibeira, Figueira-do-diabo, Figueira-da-Índia, piteira, tuna, Figueira, figo de cacto, Figos da India, Figo de pitoira.

Allemand : Nopal-Kaktus, Feigenkaktus, Feigenkaktus, Frucht des feigenkactus, Indianische feige.

En Égypte : El-tin-el-Choki.

En Maroc : le Fiquier de barbarie possède plusieurs noms vernaculaires : « zaâboul », et « aknari».

En Tunisie et en Algérie : « hendi », « hindia » où Karmous en sarra (**Benattia, 2017 ; Ghédira et Goetz, 2018**).

I.4. Distribution géographique

le Fiquier de barbarie, s'est remarquablement adapté à une grande variété de biotopes, en particulier dans les régions tropicales et subtropical à faible pluviométrie. grâce à sa capacité à stocker l'eau et à réduire le processus de transpiration.

Cette plante fait preuve d'une résistance exceptionnelle à la sécheresse, ce qui explique sa large diffusion à travers le monde, allant des zones désertiques sous le niveau de la mer aux zones de haute altitude telles que les Andes péruviennes et des régions tropicales du Mexique, où les températures sont toujours supérieures à 5 °C, aux régions glaciales du Canada qui peuvent tomber à - 40 °C (**Moussaoui, 2020**). (**figure 02**).

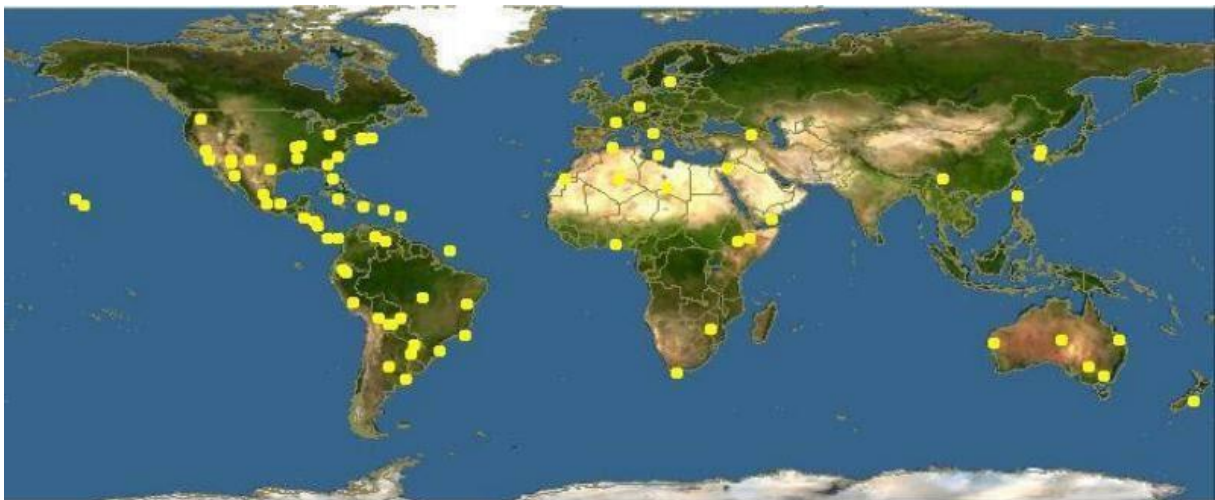


Figure 2 : Répartition géographique mondiale d'*Opuntia ficus indica* (**Benattia, 2017**).

Sa répartition géographique très vaste va de son continent natal, l'Amérique, vers l'Afrique, l'Asie, l'Europe et l'Océanie, démontrant une présence marquée à travers le monde.

Il se développe essentiellement dans le Bassin Méditerranéen, le Sud de l'Espagne, le Portugal et l'Afrique du Nord, s'y acclimatant au point de devenir un composant notable du paysage (**EL Guezane, 2022**).

Historiquement, l'introduction du cactus en Algérie a suivi une trajectoire similaire à celle observée au Maroc et en Tunisie. Actuellement, les régions consacrées à la culture de l'opuntia couvrent plus de 30 000 hectares (FAO, 2018).

En Algérie, les figuiers de barbarie sont cultivés dans les hauts plateaux algérois à une altitude de 550 mètres, ainsi qu'à environ 750 mètres à Msila et Ain-Sefra.

On peut également les observer sur les hauteurs du Chréa et Bouarfa (wilaya de Blida), ainsi que dans les wilayas de Boumerdes, Tipaza, Tissemsilt, Chlef, Relizane, Mostaganem, Aïn-Témouchent, Oran, Mascara et Sidi-Bel-Abbès (Benattia, 2017).

I.5. Taxonomie

Classification taxonomique *L'Opuntia ficus indica (L) Miller (Neffar, 2012).*

Domaine : Eucaryotes

Règne : Plantae

Sous règne : Tracheobionta

Division : Magnoliophyta

Classe : Magnoliopsida

Sous classe : Caryophyllidae

Ordre : Caryophyllales

Famille : *Cactaceae*

Sous-famille : Opuntioideae

Tribu : Ountieae

Genre : *Opuntia*

Sous-genre : *Plantyopuntia*

Espèce : *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller, 1768.

I.5.1. Famille des *cactaceae*

Les *Cactaceae*, plante grasses terrestres ou arboricole, se divisent en deux groupes selon leurs graines : les malacos permées (graines à enveloppe mince et tendre) et les scléros permées (graines à enveloppe épaisse et dure).

Leur forme varient : certains ressemblent à des arbrisseaux avec des feuilles ordinaire, d'autres ont des tiges cylindriques sans feuille, tandis que les plus connues présente des tiges aplaties en forme de raquettes. D'autres encore adoptent des formes géométriques comme cylindriques, prismatique ou sphérique (**Fournier, 1954**).

I.5.2. Genre *opuntia*

Le genre *Opuntia* est effectivement l'un des plus importants et des plus répandus au sein de la famille des Cactacées. Il comprend environ 300 espèces, réparties en quatre sous- genres, comme l'a mentionné **Habibi, (2004)**. Parmi ces sous-genres, le *Platyopuntia* inclut l'espèce *Ofi* (**Mulas,G et Mulas,M., 2004**).

I.6. Description botanique

Le Fiquier de Barbarie, appartenant à la famille des *Cactaceae* et au genre *Opuntia* (plus précisément au sous-genre *Platyopuntia*), est une plante grasse épineuse, arborescente et xérophile. Il peut atteindre une hauteur de 3 à 5 mètres et a développé des adaptations anatomiques, morphologiques et physiologiques lui permettant de croître et de survivre dans des environnements arides, où des stress hydriques sévères entravent la survie d'autres espèces végétales.

L'*Opuntia ficus indica* est composé des éléments suivants : Tiges aplaties ou cladodes, Racines, Fruits, et Fleurs (**Ghédira et Goetz, 2018 ; Odoux et Domínguez López, 1996**). (**figure03**).

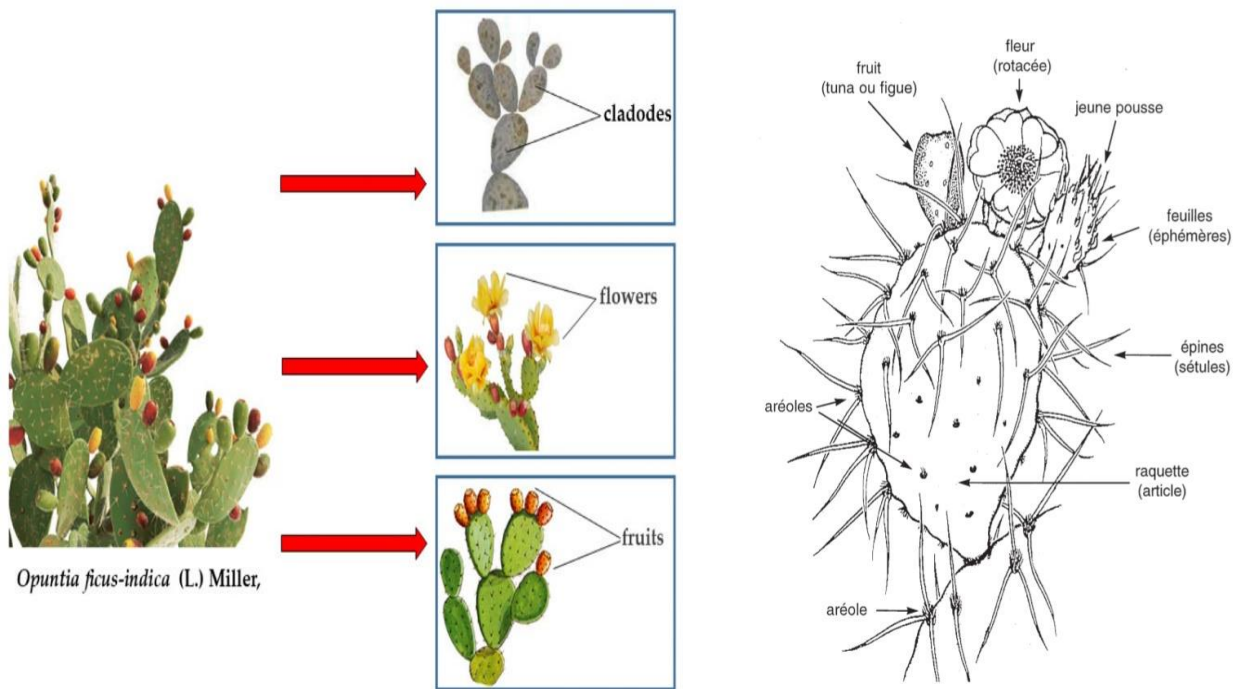


Figure 3 : Représentation des principaux organes de *O. ficus indica* (Caminiti, et al., 2024 ; Schweizer, 1997).

I.6.1 Système racinaire

Les racines des *Cactaceae*, en particulier *Opuntia ficus indica*, illustrent parfaitement leur adaptation aux environnements arides grâce à leur capacité à gérer l'eau de manière efficace, réduisant ainsi les pertes hydriques.

Pour y parvenir, ces plantes mettent en œuvre plusieurs mécanismes. Tout d'abord, elles réduisent leur surface et forment une barrière imperméable pour limiter leur exposition à la sécheresse. En cas de stress hydrique, certaines racines subissent une abscission (chute), laissant une cicatrice qui empêche l'eau de s'échapper vers le sol sec. Ensuite, les racines de pluie se développent rapidement après une averse pour absorber l'eau disponible, puis se dessèchent une fois le sol sec, optimisant ainsi l'utilisation des précipitations rares et limitant les pertes par évaporation. Enfin, grâce à un potentiel hydrique très négatif, les racines contrôlent la transpiration en réduisant la perte d'eau à travers les rameaux.

Ces mécanismes permettent à des plantes comme *Ofi* de survivre à des périodes prolongées de sécheresse (FAO, 2018).

Leur système racinaire est principalement superficiel, composé de racines fines absorbantes et charnues, s'étendant horizontalement (Martins et al., 2023 ; Caminti, et al., 2024), Et varie selon les conditions environnementales, Le type de sol et les pratiques culturales, Notamment l'irrigation et la fertilisation (Mariana Martins et al., 2023).

Dans les sols fertiles, une racine pivotante peut atteindre 30 cm de profondeur, avec une extension horizontale de 10 à 15 mètres (FAO, 2018 ; Mariana Martins et al., 2023), tandis que dans les zones arides, des racines secondaires charnues se développent pour absorber l'humidité en profondeur (Berrabah, 2019).

I.6.2 Le cladode

Chez *Opuntia ficus indica*, Les tiges, Appelées cladodes ou raquettes, Sont des organes succulents de forme elliptique ou ovoïdale (FAO, 2018). Mesurant généralement 30 à 50 cm de long, 15 à 30 cm de large et 1,5 à 3 cm d'épaisseur, Avec des variations pouvant atteindre 70 à 80 cm de long et 18 à 25 cm de large leur poids varie de 40 à 100g (FAO, 2018; Msaddak, 2018 ; Mariana Martins et al., 2023).

Ces cladodes, de couleur vert mat, sont recouverts d'une cuticule cireuse (cutine) qui limite la transpiration et les protège des prédateurs, tout en assurant la fonction chlorophyllienne en remplacement des feuilles , la partie externe du cladodes est le chlorenchyme (partie verte), qui est essentiel à son action photosynthétique, et la partie interne du cladodes est le parenchyme qui correspond à environ 50 à 70% du cladodes, ou stockées H₂O et les acides organiques (Msaddak, 2018 ; Moussaoui, 2020 ; Mariana Martins et al., 2023).

Anatomiquement, en coupe transversale, le cladode présente une structure eustélisque composée de plusieurs couches : une peau externe, un cortex, des tissus vasculaires disposés en cercle et formés de faisceaux collatéraux séparés par du parenchyme, et une moelle centrale succulente (FAO, 2018 ; Mariana Martins et al., 2023).

Cette organisation permet aux cladodes, très fibreux, de retenir l'eau et de résister à la chaleur et à la sécheresse (Neffar, 2012 ; Msaddak, 2018).

Les aréoles présentes sur les cladodes peuvent produire de nouveaux cladodes, des fleurs ou des racines, et contiennent deux types d'épines : des épines blanchâtres sclérifiées (1 à 2cm) et des glochides brunâtres, minuscules et munies de crochets, qui servent de mécanisme de défense contre les prédateurs et les conditions environnementales extrêmes (Msaddak, 2018 ; Mariana Martins et al., 2023). (figure 06).

I.6.3. Le fruit

Le fruit appelé tuna ou figue de Barbarie est une grosse baie charnue, de forme ovoïde ou piriforme. Selon les études récentes Mariana Martins et al., (2023), Il mesure entre 5 et 10 cm de long et 4 à 8 cm de large, et se développe à partir des tissus de la tige. Son poids varie généralement entre 67 et 216 g (Moussaoui, 2020). Ce fruit apparaît deux fois par an (Boutakiout, 2015), Et sa maturation est achevée environ 110 à 120 jours après la floraison.

La peau représente 30 à 40 % du poids total du fruit, Composée du péricarpe (fine couche externe présentant des glochides, de petites épines) et du mésocarpe. La couleur de la peau varie selon la variété et le niveau de maturité, allant du jaune-orange au rouge (**Mariana Martins et al., 2023 ; Caminiti, R et al., 2024**). (figure 05).

La pulpe constitue 60 à 70 % du poids du fruit. Elle est juteuse, De couleur Jaune-Orangé, Rouge ou Pourpre, et contient de nombreuses petites graines dures. La pulpe est comestible, douce, sucrée, translucide et gélatineuse (**Mariana Martins et al., 2023**). Les graines représentent 2 à 10 % du poids du fruit, et un fruit de 160 g peut contenir jusqu'à 300 graines (**Benattia, 2017**). Bien que dures et indigestes, Ces graines sont riches en vitamines et oligoéléments. Elles sont utilisées pour produire une poudre fine et une huile très recherchée (**Boutakiout, 2015**). La pulpe et la peau du fruit contiennent des pigments naturels appelés bétacyanines (composés rouges) et bétaxanthines (composés jaunes), qui sont responsables de leurs couleurs vives (**Benattia, 2017**).

La figue de Barbarie a une courte durée de conservation, généralement de 3 à 4 semaines (**Mariana Martins et al., 2023**).

I.6.4. Les fleurs

Les fleurs hermaphrodites et solitaires se développent principalement sur le sommet des cladodes âgées d'un an (**Msaddak, 2018**), et le plus souvent sur les aréoles situées au sommet des cladodes ou sur le côté le plus exposé au soleil.

De couleur jaunâtre, elles deviennent rougeâtres à l'approche de la sénescence de la plante (**Berrabah, 2019**). Grandes de 4 à 10 cm, la floraison a lieu en avril-mai (**Schweizer, 1997**).

Les jeunes fleurs portent des feuilles éphémères avec un cycle de vie d'environ 30 jours seulement (**Caminiti, R et al., 2024**). (figure 04).



Figure 4 : Les fleurs.



Figure 5 : Les Fruits.

https://fr.wikipedia.org/wiki/Figuier_de_Barbarie

https://fr.wikipedia.org/wiki/Figuier_de_Barbarie



Figure 6 : Les Cladodes.

<https://images.app.goo.gl/BJGTuWHFs8sGvonw8>

I.7. Physiologie de la plante

Au cours de leur évolution, les plantes ont développé des adaptations comme le métabolisme acide crassulacéen (CAM), essentiel pour survivre dans des environnements arides.

Les plantes CAM, comme *L'Ofi*, fixent le CO_2 la nuit via la phosphoénol pyruvate carboxylase (PEPC), stockant sous forme de malate dans les vacuoles des cellules du mésophylle.

Le jour, le malate est décarboxylé, libérant du CO_2 pour la fixation par la ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygénase (RubisCO), permettant la photosynthèse avec les stomates fermés, réduisant ainsi les pertes d'eau (Nosek, et al., 2018 ; Monteiro et al., 2023).

Ce mécanisme optimise l'efficacité hydrique mais nécessite une énergie élevée pour la fixation et le stockage du CO_2 .

Les plantes CAM produisent également des composés bioactifs (acides carboxyliques, flavonoïdes et les phénols) en réponse au stress hydrique et thermique, renforçant leur résilience (Lallouche, 2018 ; Monteiro et al., 2023). (figure 07).

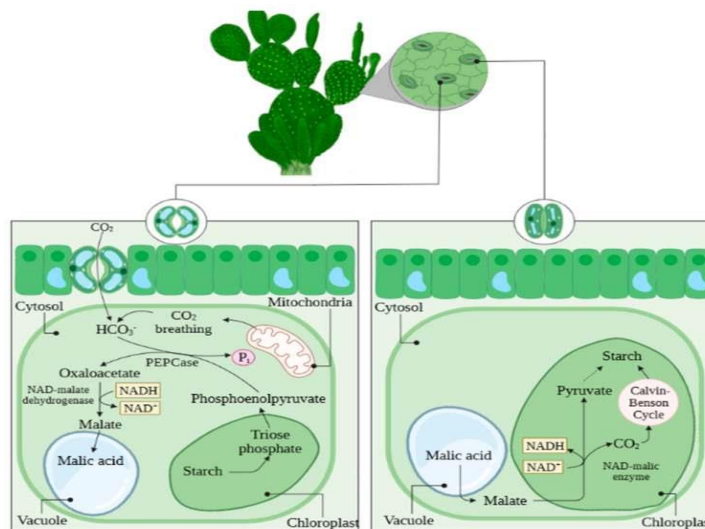


Figure 7 : Représentation du métabolisme acide crassulacéen (CAM) pendant la nuit et le jour

(Monteiro et al., 2023).

I.8. Usages traditionnels

Si le figuier de Barbarie (cactus) était l'une des cultures de base des Aztèques et a réussi à s'adapter à toutes les régions semi-désertiques, il est naturel de constater une large diffusion de ses multiples utilisations. Parmi les utilisations les plus notables de cette plante :

I.8.1 Usage médicinale

Depuis l'Antiquité, on ne connaît d'autres thérapeutiques que l'application des plantes et l'usage de leurs sucs. Servi de base aux traitements médicaux (**Schweizer, 1997**).

l'Opuntia ficus indica est utilisée pour ses multiples vertus thérapeutiques :

Les cladodes : sont utilisés pour soigner les blessures, les inflammations et les maux de tête.

La pulpe : traite la dysenterie. Les fruits : soulagent les coliques et la diarrhée, mais une surconsommation peut causer de la constipation. Les fleurs : (en poudre ou en décoction) agissent comme diurétiques, régulent la glycémie et traitent les troubles gastriques et rénaux.

Traditionnellement, Chez les Aztèques, les femmes enceintes consommaient des extraits de cactus pour leurs effets tonifiants et galactogènes, facilitant ainsi l'accouchement (**Keller et al., 2009**).

La recherche moderne a validé les vertus du Nopal, longtemps reconnues par la médecine traditionnelle. Le figuier de Barbarie (*Ofi*), notamment ses fruits et ses cladodes, est une source riche en nutriments et en molécules bioactives bénéfiques pour la santé.

De nombreuses études confirment son utilisation dans la prophylaxie de diverses maladies, mettant en avant des propriétés médicinales telles que des effets antioxydants, anti-inflammatoires, hypoglycémiantes et hypocholestérolémiantes. Ces découvertes renforcent l'importance de cette plante dans la prévention et le traitement de divers troubles de santé (**Mariana Martins et al., 2023**).(figure 08).

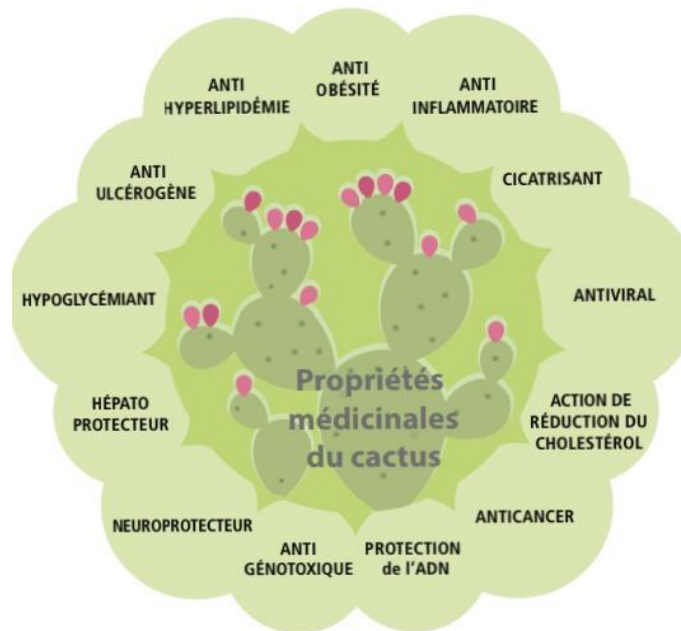


Figure 8 : Propriétés médicinales de l'*Ofi* (FAO, 2018).

I.8.2 Usage Alimentaire

L'alimentation humaine tire de nombreux bénéfices de la consommation des Figues de Barbarie, dont l'utilisation la plus courante est la consommation à l'état frais (Moussaoui, 2020). Ce fruit possède une composition minérale et chimique riche, comparable à celle des autres fruits. En moyenne, il contient 85 % d'eau, 15 % de sucres, 0,3 % de sels et moins de 1 % de protéines. Il constitue également une excellente source de vitamine C et offre un apport énergétique significatif (Neffar, 2012). (figure 09).

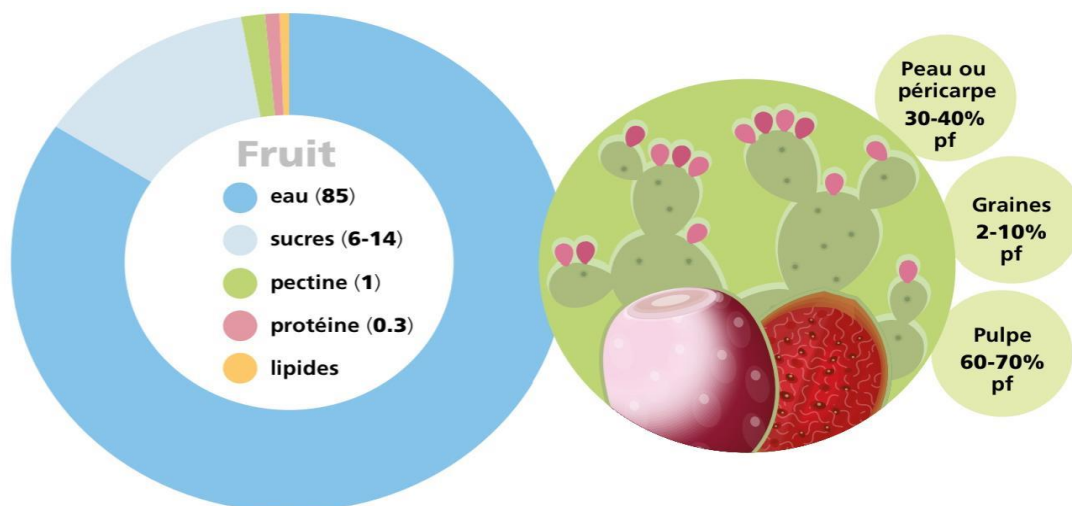


Figure 9 : Composition chimique du figuier de Barbarie (en % de matière fraîche) et constitution du fruit en pourcentage du poids du fruit (pf) (FAO, 2018).

Outre leur consommation fraîche, les Figues de Barbarie peuvent être préparées de diverses manières : bouillies dans l'eau, séchées, congelées, fermentées ou transformées technologiquement en produits à haute qualité sensorielle et stabilité microbologique.

Elles servent également de base à la production d'une variété de produits alimentaires, tels que des jus, des nectars, des conserves, boissons alcoolisées (Colanche, Téquila) et confiture....(Keller et al., 2009 ; Moussaoui, 2020).

Certains de ces produits sont bien connus, tandis que d'autres sont récemment développés ou encore en cours de recherche.

La pulpe et le jus sont les utilisations les plus répandues et domestiques du Figuier de Barbarie. Plusieurs études ont mis en évidence que le jus de Figue de Barbarie possède un goût et un parfum agréables. De plus, la pulpe peut être utilisée pour préparer des gels (Benattia, 2017). (figure 10).



Confiture de cladode Et citron..



Nappage de figue de Barbarie coloré sur dessert laitier



Préparation gélatineuse de figues



Vinaigres Balsamiques des figues

Figure 10 : Images de certains produits issus du Fiquier de Barbarie (FAO, 2018).

Les jeunes raquettes, appelées "Nopalitos", sont des légumes traditionnels consommés depuis des siècles, qu'ils soient frais ou cuits. Elles sont utilisées comme légumes verts dans la préparation de salades, de soupes, de boissons et de sauces. Elles représentent une source alimentaire importante dans des pays comme le Mexique et le sud des États-Unis (Keller et al., 2009 ; Boutakiout, 2015 ; Benattia, 2017).

D'après Monteiro et al., (2023), Les cladodes sont riches en eau, en glucides, en protéines, en vitamine C et en bêta-carotène, qui est un précurseur de la vitamine A. (figure 11).

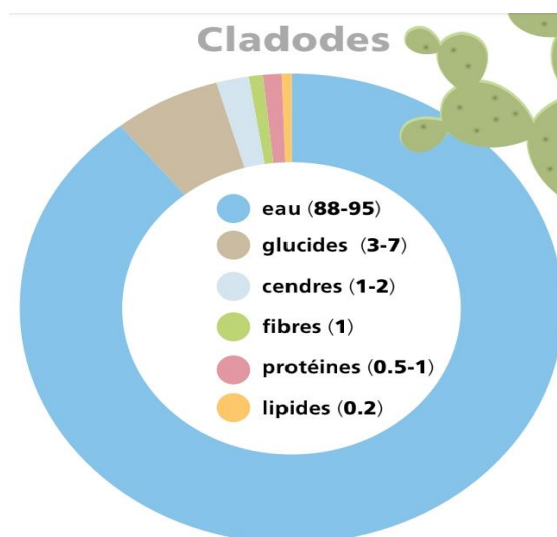


Figure 11 : Composition du cladode proximal en (%) (FAO, 2018).

I.8.3 Usage fourrager

En période de disette, les fruits et les feuilles de *l'Ofi* se distinguent par leur richesse en protéines, en eau, en sucres solubles et en nutriments essentiels, ce qui en fait une ressource fourragère de choix. Les cladodes de cactus, quant à eux, constituent une source alternative de fourrage hautement nutritive, largement utilisée pour l'alimentation des chèvres, des moutons et des vaches. Cette pratique est répandue dans diverses régions arides et semi-arides d'Afrique, d'Asie, d'Amérique et d'Europe, où ces plantes résistantes à la sécheresse jouent un rôle crucial dans le maintien du bétail (Shoukat *et al.*, 2023).

La production de fourrage est la deuxième utilisation majeure du cactus indien, avec une productivité de l'*Opuntia* en matière sèche variant entre 12 et 16 tonnes/ha selon les régions (Neffar, 2012 ; Benattia, 2017). (figure 12).



Figure 12 : Raquettes coupées pour la consommation par le bétail (FAO, 2018).

I.8.4 Usage cosmétique

Depuis des siècles, les femmes amazighes et amérindiennes utilisent les propriétés cosmétiques du Figuier de Barbarie. Elles préparent des savons et des onguents à base d'extraits de nopal et pour protéger leurs mains et leurs visages des rayons du soleil et des travaux agricoles pénibles. De même, les femmes amazighes utilisaient l'huile de Figuier de Barbarie pour soigner les blessures et protéger leur peau des vents brûlants du désert, redonnant ainsi à leur épiderme fraîcheur et élasticité (**Schweizer, 1997 ; Benattia, 2017**).

Aujourd'hui, les sciences cosmétiques modernes confirment les bienfaits de Figuier de Barbarie qui contient une grande variété de composés utiles, notamment des antioxydants, des acides gras essentiels et des polyphénols. Il contribue à l'amélioration de la peau, à l'hydratation et au soin des plaies. Etant intégrés, Dans la fabrication shampoings, des assouplissants des cheveux, des crèmes dermiques et des laits hydratants et autre produit cosmétique.

Par ailleurs, l'intérêt des industriels pour l'huile de graines et Le mucilage des cladodes d'*Ofi* ne cesse de croître, celle-ci devenant un ingrédient clé dans de nombreux produits de soins pour la peau (**Arba, 2009 ; Benattia, 2017 ; Shoukat, et al., 2023**).



CHAPITRE II

Huile végétale



II.1. Généralité sur les huiles végétales

II.1.1 Définition

Les huiles végétales, également appelées huiles Fixes, Elles font partie de la culture humaine depuis des millénaires. Sont des corps gras non-volatiles extraites principalement des graines ou des noyaux de plantes, Leur état physique à température ambiante (liquide ou solide) dépend de leur degré de saturation.

Ces huiles, bien que présentes dans les cellules oléifères des végétaux, sont souvent difficiles à extraire, ce qui explique leur coût élevé et leur disponibilité limitée (**Louer et Zermane, 2019 ; Ayari, 2021**).

Chimiquement, elles sont principalement composées de triglycérides, des molécules formées par l'estérification des trois groupes hydroxyle du glycérol avec des acides gras.

Ces triglycérides représentent environ 98 % de la composition des huiles végétales, tandis que les 2 % restants incluent des composants mineurs tels que des acides gras libres, des mono- et diglycérides, des phospholipides et des insaponifiables (**Gagnon, 2021**). (**figure 13**).

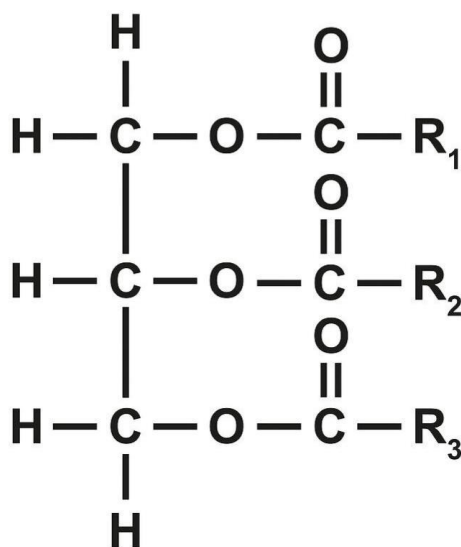


Figure 13 : Structure général d'un triglycéride (Composante majeure de l'huile végétale)

(<https://images.app.goo.gl/UELvWJxRTjPdsJTG8>).

II.1.2 Composition des huiles végétales

Les huiles végétales sont principalement composées de triglycérides (TG), qui représentent entre 90 et 99 % de leur composition.

Ces TG sont eux-mêmes constitués majoritairement d'acides gras (AG) (90-95 %) et de glycérol (3-5 %), formant ce qu'on appelle la fraction saponifiable.

Par ailleurs, les huiles végétales contiennent également des composés minoritaires naturels (1-5 %), dits insaponifiables, tels que les stérols, les tocophérols, les caroténoïdes ou les phospholipides (0,1 à 0,2 %) (Benslimane, 2020). (figure 14).

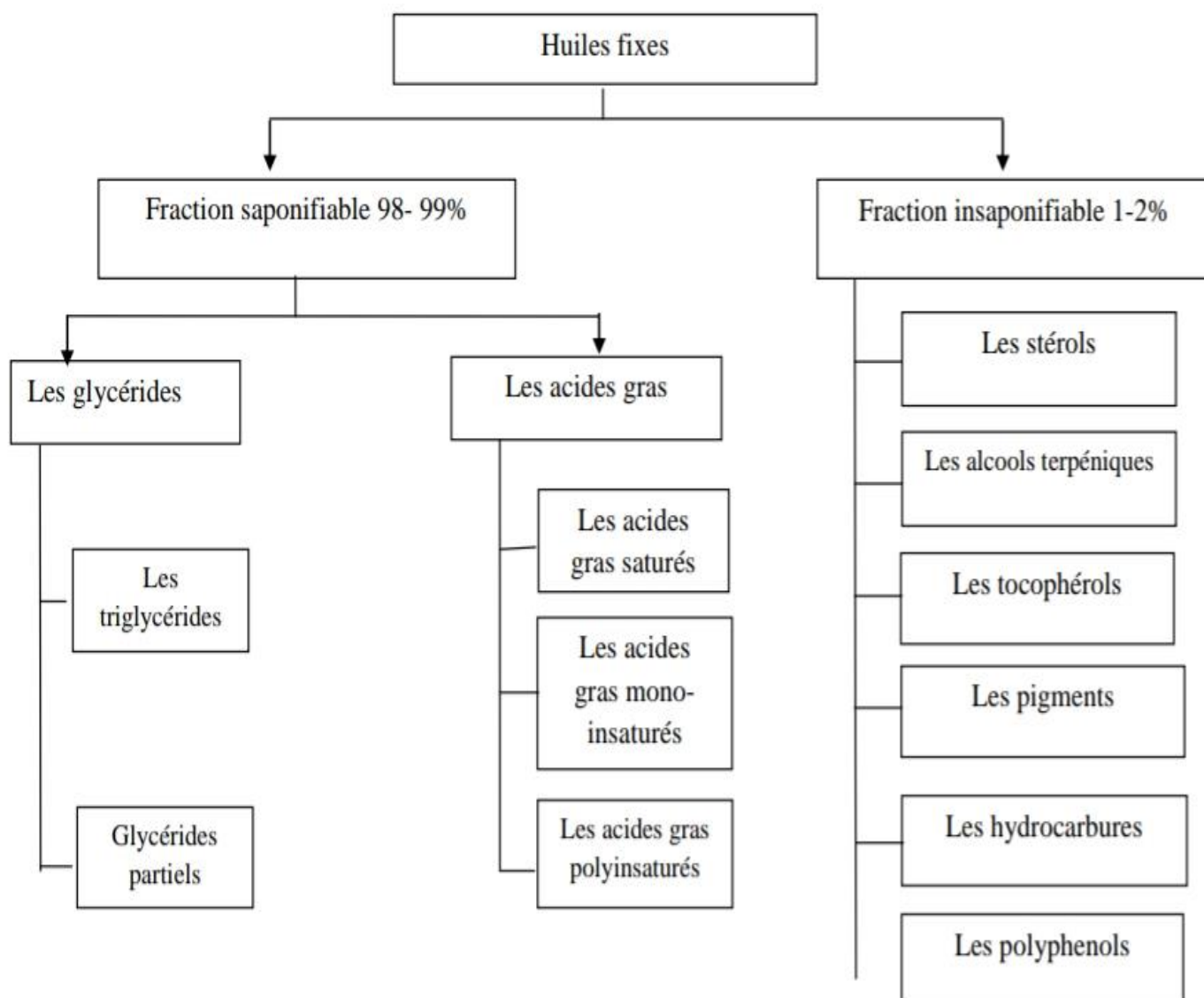


Figure 14 : Constituants des huiles végétales (Zakkad, 2017).

II.1.2.1 Les composés majoritaires d'une huile végétale

➤ Triglycérides (TG)

Ces (TG) sont résultent de l'estérification des trois groupes hydroxyle d'une molécule de glycérol par des acides gras (AG), qui peuvent être identiques ou variés (**Benslimane, 2020**).

Il est à noter que les trois acides gras associés à un triglycéride peuvent différer par plusieurs aspects, tels que la longueur de leur chaîne carbonée, la présence éventuelle de ramifications, ou encore le nombre et la configuration (cis ou trans) de leurs doubles liaisons. Cette diversité contribue à la variété des propriétés physico-chimiques des huiles végétales (**Gagnon, 2021**).

(figure 15).

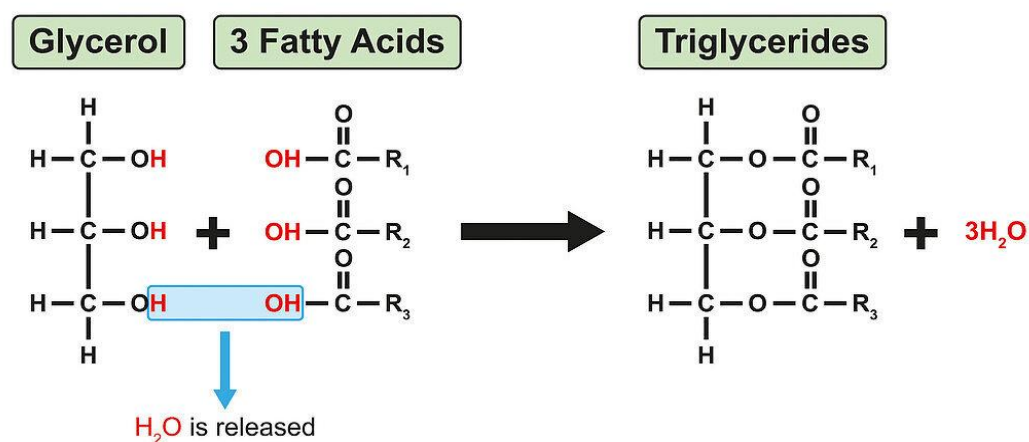


Figure 15 : Réaction de formation des triglycérides (<https://images.app.goo.gl/x76hDuVvnYKRdZPs8>).

➤ Les acides gras (AG)

Les acides gras (AG) constituent les principaux composants des triglycérides (TG) et sont rarement présents à l'état libre. Ce sont des acides carboxyliques (R-COOH) dont le radical R est une chaîne aliphatique de type hydrocarbure, de longueur variable, conférant à la molécule un caractère hydrophobe. Le radical se termine par un groupe méthyle (CH₃), ce qui implique que la solubilité dans l'eau diminue avec l'augmentation du nombre d'atomes de carbone dans la chaîne (**Ayari, 2021**).

Les acides gras saturés (AGS) ont une formule générale brute de la forme C_nH_{2n}O₂ et une formule développée CH₃-(CH₂)_{n-2}-COOH. Ils se caractérisent par une chaîne hydrocarbonée apolaire, plus ou moins longue, terminée par un groupement carboxylique polaire ou chargé négativement (carboxylate) (**Ayari, 2021**).

En revanche, les acides gras insaturés (AGI) possèdent au moins une double liaison dans leur chaîne aliphatique, généralement de configuration "cis". Ces liaisons sont relativement instables. Les AGI représentent plus de la moitié des acides gras présents dans les plantes et les animaux. Ils peuvent être classés en séries ω3, ω6 et ω9, en fonction de la position de la première double liaison par rapport à l'extrémité méthylque. Ainsi, la première double liaison est située respectivement au troisième, sixième ou neuvième atome de carbone à partir du groupe méthyle terminal (Ayari, 2021).

Les chaînes d'acides gras naturelles contiennent généralement un nombre pair d'atomes de carbone, variant de 4 à 22 (Benslimane, 2020).

Dans le règne végétal, cinq acides gras sont particulièrement abondants : les acides gras saturés palmitique (C16:0) et stéarique (C18:0), ainsi que les acides gras insaturés oléique (C18:1), linoléique (C18:2) et α-linolénique (C18:3). Le degré d'insaturation peut aller jusqu'à six doubles liaisons (Ayari, 2021).

Tableau I : Représentant les AG les plus abondants dans les huiles végétales (Benslimane, 2020).

AGS :CH ₃ (CH ₂) _n COOH	AGI:
Acide laurique: C ₁₂ Acide myristique : C ₁₄ Acide palmitique : C ₁₆ Acide stéarique : C ₁₈ Acide arachidique : C ₂₀	<ul style="list-style-type: none"> • Acide oléique : C₁₈, 1 double liaison CH₃^(CH₂)₇^CH=CH^(CH₂)₇^COOH • Acide linoléique : C₁₈, 2 doubles liaisons CH₃^(CH₂)₄^CH=CH^CH₂^CH=CH^(CH₂)₇^COOH • Acide linoléique : C₁₈, 3 doubles liaisons CH₃CH₂^CH=CH^CH₂^CH=CH^CH₂^CH=CH^(CH₂)₇^COOH (il existe un isomère γ avec les doubles liaisons en C ₆ , C ₉ et C ₁₂) *double liaison : =

II.1.2.2 Les composés minoritaires d'une huile végétale

Les huiles végétales contiennent une faible proportion d'acides gras libres, de phospholipides et d'autres composants variés (1 à 5 %), essentiels sur le plan nutritionnel.

Elles se composent d'une fraction insaponifiable (Dénommée ainsi, car elle ne peut pas Réagir avec une base pour donner du savon et regroupe : Les tocophérols, stérols, pigments, Les hydrocarbures et les caroténoïdes...), responsable de leurs propriétés biologiques, et

d'une fraction soluble (exemples : phénols simples et poly-phénols...), influençant leur goût et de leur trouble (Benslimane, 2020).

II.2 Les procédés d'extraction des l'huile végétales

L'extraction solide-liquide est une technique de séparation qui consiste à transférer un ou plusieurs composants d'une phase solide vers un solvant liquide. L'objectif de cette opération est d'isoler et de récupérer les substances d'intérêt présentes dans le solide en les dissolvant dans un solvant approprié. L'extraction des huiles à partir de substances végétales est un procédé qui a connu un développement significatif et qui est largement utilisé dans de nombreux secteurs industriels, tels que la pharmacie, la cosmétique, la parfumerie et l'agroalimentaire. La complexité de la structure des matériaux végétaux, ainsi que la diversité des composés à extraire (différences de poids moléculaires, polarité, interactions avec la structure, etc.), ont favorisé l'émergence d'une multitude de techniques d'extraction adaptées à ces spécificités. Ces techniques d'extraction peuvent être classées en deux catégories : extraction conventionnelles, utilisées depuis longtemps, et les technologies innovantes, développées plus récemment (Louaer, 2019).

II.2.1 Méthodes conventionnelles d'extraction des huiles végétales

➤ Extraction mécanique

L'extraction mécanique est l'une des plus anciennes méthodes utilisées pour l'extraction de l'huile. En principe, les graines sont placées entre des barrières où le volume disponible pour la graine est réduit par pressage relativement élevée de 500 bars dans des presses, ce qui force l'huile à sortir des graines (Akretche, 2015; Nde et froncha, 2020).

L'extraction de l'huile par presses mécaniques est la plus courante réalisée à froid ou à chaud, et implique l'utilisation de presses hydrauliques ou de presses à vis entraînées par un moteur. Bien que Les avantages de l'extraction mécanique comprennent la production d'huile de bonne qualité (efficace), il donne généralement un très faible rendement en huile, Les avantages de la presse à vis par rapport à la presse hydraulique sont ses rendements légèrement améliorés et sa capacité à être adaptée au traitement en continu (Louaer, 2019 ; Nde et froncha, 2020).

➤ Extraction par solvant

L'extraction par solvant est une technique largement utilisée pour récupérer l'huile difficile d'accès, offrant une efficacité remarquable avec un taux de récupération dépassant souvent 97 % (**Gagnon, 2021**).

IL est généralement effectuée par lots ou en continu. Elle comprend trois étapes principales : le nettoyage et le conditionnement des graines, l'extraction de l'huile, et la séparation du miscella (**Nde et froncha, 2020**).

Cette méthode consiste à mettre en contact la matière première avec un solvant organique adapté, dont le choix est déterminant pour obtenir des extraits de composition souhaitée (**Louaer, 2019**).

Parmi les solvants employés, l'hexane (ou n-hexane, sa forme isomérisée) est le plus couramment utilisé dans l'industrie oléagineuse en raison de ses propriétés avantageuses : grande sélectivité pour les lipides, faible coût, recyclabilité, nature non polaire, faible chaleur de vaporisation et point d'ébullition bas (63–67 °C) (**Lavenburg et al., 2021**).

Cependant, malgré son efficacité et son aspect économique, l'utilisation de l'hexane présente des inconvénients majeurs. Il est classé comme substance dangereuse selon plusieurs critères : CMR (cancérogène, mutagène, reprotoxique) (**Gagnon, 2021**).

➤ Extraction par Soxhlet

L'appareillage « Soxhlet » est une méthode d'extraction par solvant la plus ancienne, est la plus référencée, utilisée pour isoler des espèces chimiques contenues dans une matrice solide. Le procédé consiste à placé la matière à extraire à l'intérieur d'une cartouche en matériau poreux chimiquement inerte puis transféré dans le corps principal en verre de l'extracteur. Le solvant est placé dans le ballon, puis installé en dessous du corps principal, et au-dessus d'un chauffe-ballon. Au-dessus de l'extracteur se trouve un réfrigérant facilitant la condensation des vapeurs de solvant et leur recyclage. De cette façon, le cycle d'extraction se répète continuellement (**Tiên do, 2016**).

Bien que cette technique soit efficace pour une extraction exhaustive, elle présente plusieurs limites. D'un point de vue sélectivité, le solvant utilisé peut extraire plusieurs composés simultanément, ce qui réduit la précision de l'extraction. De plus, la méthode est difficilement

automatisable, ce qui limite son application dans des contextes industriels modernes. Sur le plan économique et environnemental, l'extraction Soxhlet est coûteuse en raison de la durée importante de l'opération et de la grande quantité de solvant consommée (Louaer, 2019). (figure 16).

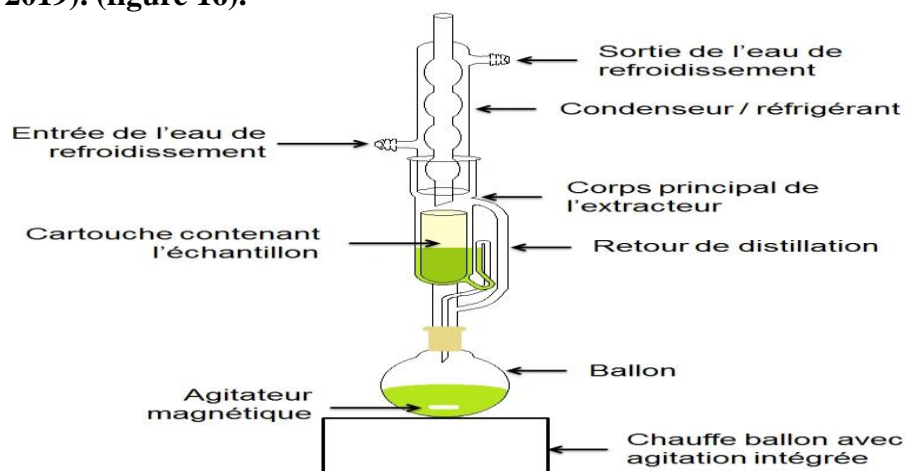


Figure 16 : extracteur de Soxhlet (Tiên do, 2016).

➤ Macération

La macération est une méthode d'extraction traditionnelle largement utilisée dans les laboratoires et les industries pour isoler des composés à partir de diverses matrices. Elle comprend trois étapes principales : le broyage de l'échantillon en fines particules pour augmenter la surface de contact avec le solvant, l'immersion du matériau broyé dans un récipient fermé entièrement recouvert de solvant pendant une durée déterminée (avec éventuellement l'ajout de chaleur pour améliorer le transfert de masse), et la filtration de l'extrait liquide suivie d'une séparation par pressage ou centrifugation. Les extraits obtenus sont ensuite filtrés pour éliminer les impuretés et concentrés par évaporation.

Bien que cette technique soit peu coûteuse et adaptée aux composés thermolabiles grâce à la possibilité d'ajuster la température, elle peut nécessiter de grandes quantités de solvant et des temps d'extraction prolongés, allant de quelques heures à plusieurs semaines, pour atteindre une efficacité optimale (Martins *et al.*, 2023). (figure 17).

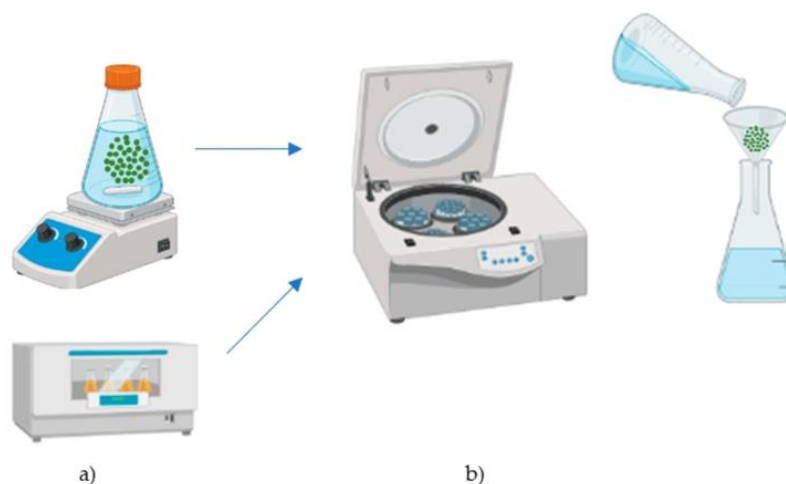


Figure 17 : Schéma de principe de l'extraction par macération : (a) agitation intermittente ou continue ; (b) centrifugation et/ou filtration (Martins *et al.*, 2023).

II.2.2 Méthodes innovantes d'extraction des huiles végétales

➤ Extraction par fluide supercritique

L'extraction par fluide supercritique (SFE) est une technique verte et innovante de plus en plus utilisée. Les fluides supercritiques, comme le dioxyde de carbone (CO_2), se caractérisent par des propriétés physiques uniques qui peuvent être modulées en ajustant la pression et la température au-delà de leurs points critiques. Cela permet d'augmenter le transfert de masse avec le soluté à extraire et d'ajuster la sélectivité du solvant pour cibler des composés spécifiques. Le CO_2 est le fluide supercritique le plus couramment utilisé en raison de son faible coût, de sa non-toxicité et de son inertie chimique. Son point critique est atteint à 30,99 °C et 7,38 MPa, où il présente une densité et une viscosité intermédiaires entre celles d'un gaz et d'un liquide, ce qui en fait un solvant idéal pour l'extraction sans laisser de résidus (Deng, 2023 ; Herzi, 2013). (figure 18).

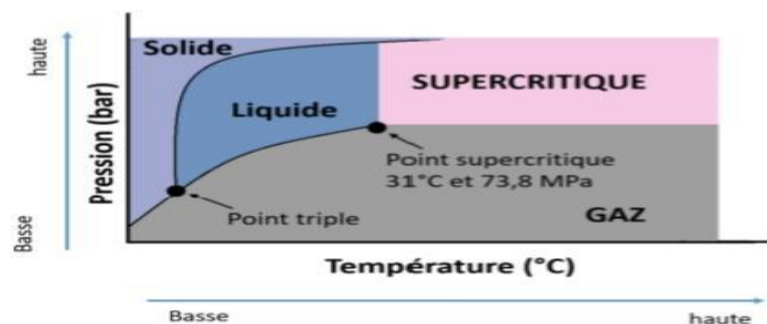


Figure 18 : Diagramme de phase du CO_2 (Deng, 2023).

Le procédé d'extraction par CO₂ supercritique se déroule en deux étapes principales. La première étape est l'extraction : le CO₂ est refroidi et pompé pour atteindre des conditions supercritiques, puis il percole à travers la matière à extraire dans un extracteur, en flux ascendant ou descendant. La deuxième étape est la séparation : le mélange extrait-CO₂ est détendu dans un séparateur, permettant de récupérer l'extract d'un côté et le CO₂ gazeux de l'autre. Ce dernier est ensuite recyclé dans le système, rendant le procédé à la fois économique et écologique (Louaer, 2019). (figure 19).

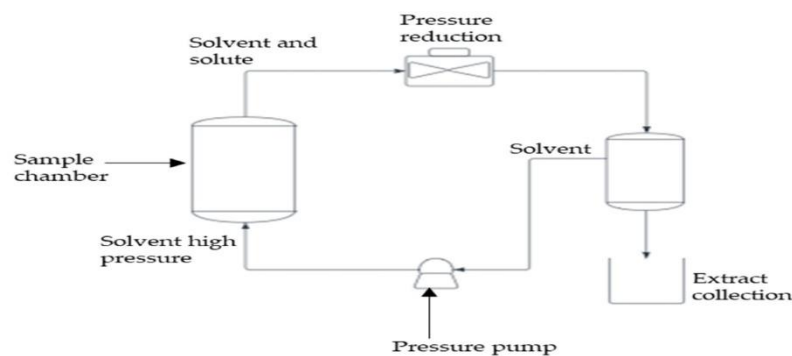


Figure 19 : Diagramme schématisé de l'extraction par fluide supercritique

<https://images.app.goo.gl/uPiSdHcSQ2ukps566>.

II.3 Propriétés chimiques des huiles végétales

➤ Indice d'acide (I.A)

L'indice d'acide représente la quantité de potasse KOH (en milligrammes) requise pour neutraliser les acides gras libres présents dans 1 gramme de matière grasse. La qualité d'une huile est déterminée par sa teneur en acides gras libres : plus cette teneur est faible, plus la qualité de l'huile est élevée (Zakkad, 2017).

➤ **Indice de saponification (I.S)**

L'indice de saponification est une mesure importante en chimie des lipides, utilisée pour déterminer la quantité de potasse caustique (KOH) nécessaire pour saponifier complètement un gramme de matière grasse (Zakkad, 2017).

➤ **Indice d'iode(I.I)**

L'indice d'iode est une mesure utilisée pour évaluer le degré d'insaturation des acides gras présents dans une matière grasse. Il correspond à la masse d'iode (I_2), exprimée en milligrammes (mg), nécessaire pour saturer toutes les doubles liaisons présentes dans 1 gramme de matière grasse. Plus l'indice d'iode est élevé, plus la matière grasse contient de doubles liaisons, ce qui indique un degré d'insaturation plus important. Cet indice est donc un indicateur de la proportion d'acides gras insaturés (Zakkad, 2017).

➤ **Indice de peroxyde (I.P)**

L'indice de peroxyde mesure la quantité d'oxygène actif dans un corps gras qui peut libérer de l'iode à partir des iodures. Cette mesure repose sur la réaction entre l'oxygène actif des peroxydes et les iodures, qui produit de l'iode. Les résultats sont donnés en milliéquivalents d'oxygène actif par kilogramme de matière grasse (Zakkad, 2017).

II.4. Composition chimique de l'huile végétale de figue de Barbarie

De nombreuses études ont mis en évidence le potentiel des graines de figue de Barbarie en tant que nouvelle source d'huiles végétales. En effet, huile de pépins de figue de barbarie (PPSO), représente entre 5 % et 15,5 % de leur composition totale (Al-Naqeb et al., 2021).

Cette huile se distingue par une composition riche et nutritive, contenant une variété de molécules bénéfiques pour la santé (El Kharrassi, 2015).

II.4.1 Composition en acides gras

Selon une recherche menée par Al-Naqeb et al., (2021), qui a synthétisé plusieurs études sur le PPSO dans des situations géographiques variées, les méthodes d'extraction et les solvants utilisés diffèrent. Les résultats montrent que le PPSO est particulièrement riche en acides gras insaturés, représentant 80 à 88 % de sa composition. Parmi ces acides gras, l'acide linoléique (49,3 à 78,8 %) et l'acide oléique (12,8 à 25,3 %) dominent, suivis de l'acide vaccénique (4,3 à 6,3 %) et de l'acide linoléique (0,23 à 1,1 %). En ce qui concerne les acides gras saturés, les

principaux sont l'acide palmitique (9,3 à 14,3 %) et l'acide stéarique (2,2 à 4,3 %). Ces données sont résumées dans le **tableau II**.

Tableau II : Composition en acides gras principaux de l'huile de pépins de figue de barbarie (Al-Naqebet *al.*, 2021).

Source du PPSO	Acide gras principal					
	% d'acides gras insaturés				% d'acides gras saturés	
	Linoléique	oléique	Linoléique	Vacciné	Palmitique	stéarique
Maroc	62,0	21,0	0,30	NR	12,0	3,0
Espagnol	57,7–63,1	19,0–21,8	0,23–1,10	NR	12,5–15,1	2,6–4,1
Mexique	66,5–76,1	9,3–19,9	NR	NR	5,6–56,2	15,5–36,1
	60,5–78,8	10,7–19,9	NR	NR	2,9–6,1	2,9–5,2
Algérie	49,7–56,1	15,6–19,3	0,24	4,30	10,1 ± 0,2	2,8 ± 0,2
Egypte	54,03	22,41	0,63	NR	17,11	3,49
Tunisie	61,6 ± 0,1	21,2 ± 0,16	0,20	NR	12,2 ± 0,03	3,3 ± 0,03
Chypre	55,9–60,1	15,6–17,6	NR	NR	12,4	4,0
Sicile/Italie	58,0	18,0	NR	6,3	12,0	4,0
Afrique du Sud	56,9–65,2	16,4–22,5	NR	NR	12,7–16,1	2,2–3,4
Yémen	57,0	22h30	0,23	NR	14,0	3,0
Maroc	60,2–64,6	18,2–22,3	0,3	NR	11,6–12,4	3,0–3,4
Tunisie	57,6–57,5	22,3–25,3	0,2–0,5	NR	14,3–11,3	3,12–4,3
Turquie	49,3–62,1	13,0–23,5	0,3	5,0–6,3	10,6–12,8	3,3–5,4
Tunisie	70,3 ± 0,6	16,8 ± 0,5	NR	NR	9,3 ± 0,2	3,1 ± 0,1
Marché local, Berlin, Allemagne	53,5 ± 4,9	18,3 ± 1,6	NR	2,6 ± 0,2	20,1 ± 2,3	2,7 ± 0,1

NR = non signalé.

II.4.2 Teneur en phytostérols et en tocophérols

PPSO contient d'autres composés précieux, tels que les stérols et les tocophérols. Ces composés étudiés et validés scientifiquement jouent un rôle significatif dans la prévention et le soulagement de diverses maladies comme l'athérosclérose et le diabète (Al-Naqeb *et al.*, 2021).

D'après des études antérieures de El-Mostafa *et al.*, (2014), ont documenté le β -sitostérol comme le principal stérol extrait de PPSO, Il est présent en une quantité de 1,66 à 8,76 g/kg. Des teneurs similaires en campestérol sont trouvées dans d'autres huiles alimentaires telles que l'huile d'argan (4 g/kg), tandis que des teneurs plus élevées ont été mesurées dans l'huile de soja (entre 19 et 23 g/kg). D'autres stérols sont présents en petites quantités, notamment le stigmastérol, le lanostérol, l'avénastérol Δ^5 , Δ^7 -avénastérol et l'ergostérol. Concernant les teneurs en vitamine E : 0,403 g/kg, principalement du γ -tocophérol (0,330 g/kg).

Cela est également confirmé par une étude menée par Al-Naqeb *et al.*, (2021) qui indique que le β -sitostérol et le campestérol se sont avérés être les principaux composés phytostérols, et que les γ -tocophérols sont la forme majoritaire présente dans les tocophérols.

Tableau III : Composition en phytostérols et en vitamine E (%) de l'huile de pépins de figue de barbarie (Al-Naqeb *et al.*, 2021).

Composition	Composition du stérol total et de la vitamine E totale (%)						
	Références						
	[22]		[40]	[2]	[23]	[1]	[4]
	Hexane	2-MeO					
Phytostérol				NR		NR	
β -sitostérol	75,6 \pm 0,7	82,8 \pm 0,7	74,7 \pm 1,2	75,9–81,8	81,9	71,60	72,0
Campestérol	11,6 \pm 0,1	12,3 \pm 0,1	10,3 \pm 0,1	8,9–13,1	6,4	20,2 \pm 0,1	16,6 \pm 0,2
Δ^5 -Avénastérol	4,4 \pm 0,1	4,1 \pm 0,1	5,1 \pm 0,2	3,6–6,7	NR	5,1	NR
Stigmastérol	3,3 \pm 0,03	3,4 \pm 0,5	1,5 \pm 0,04	1,8–3,0	NR	4,7	3,0 \pm 0,04
Δ^7 -Avénastérol	2,0 \pm 0,03	2,2 \pm 0,02	2,3 \pm 0,1	0,1–0,9	NR	2,3 \pm 0,01	2,9 \pm 0,03
Δ^7 -stigmastérol	1,8 \pm 0,02	2,2 \pm 0,02	1,1 \pm 0,02	0,3–1,5	NR	-	0,5 \pm 0,01
Cholestérol	1,8 \pm 0,4	1,5 \pm 0,4	0,97 \pm 0,03	0,9–1,3	NR	0,1 \pm 0,0	ND
Schottenol					1,29		
Spinastérol					1,60		
Campestanol					0,82		
sitostanol					7,94	5,7 \pm 0,02	
vitamine E							
α -tocophérol	1,8 \pm 0,5	1,95 \pm 0,5	1,1 \pm 0,1	1,3–2,5	NR	0,11 \pm 0,0	0,56
β -tocophérol	ND	ND	ND	0,0–0,3	NR	0,00	0,12
γ -tocophérol	68,4 \pm 0,5	67,5 \pm 0,5	98,5 \pm 0,1	86,5–91,7	NR	94,1	80,0
δ -tocophérol	7,5 \pm 0,5	8,26 \pm 0,5	0,46 \pm 0,1	6,5–10,9	NR	3,4	5,0

NR = non signalé. ND = non détecté.

D'autres études aussi de **Alqurashi et al., (2022)**, qui ont réalisé dans le royaume de l'Arabie saoudite occidentale révèle que l'huile de graines d'*Opuntia ficus indica* présente un profil tocophérol élevé, composé d' α -, γ - et β -tocophérols. Ces résultats montrent que le tocophérol total est de 24,02 $\mu\text{g/mL}$, le β -tocophérol étant la principale forme de tocophérols dans l'huile d'*OFI* avec un score de 42,21 %, le γ -tocophérol avec un score de 41,13 % et l' α -tocophérol avec un score de 16,65 %. (**figure 20**).

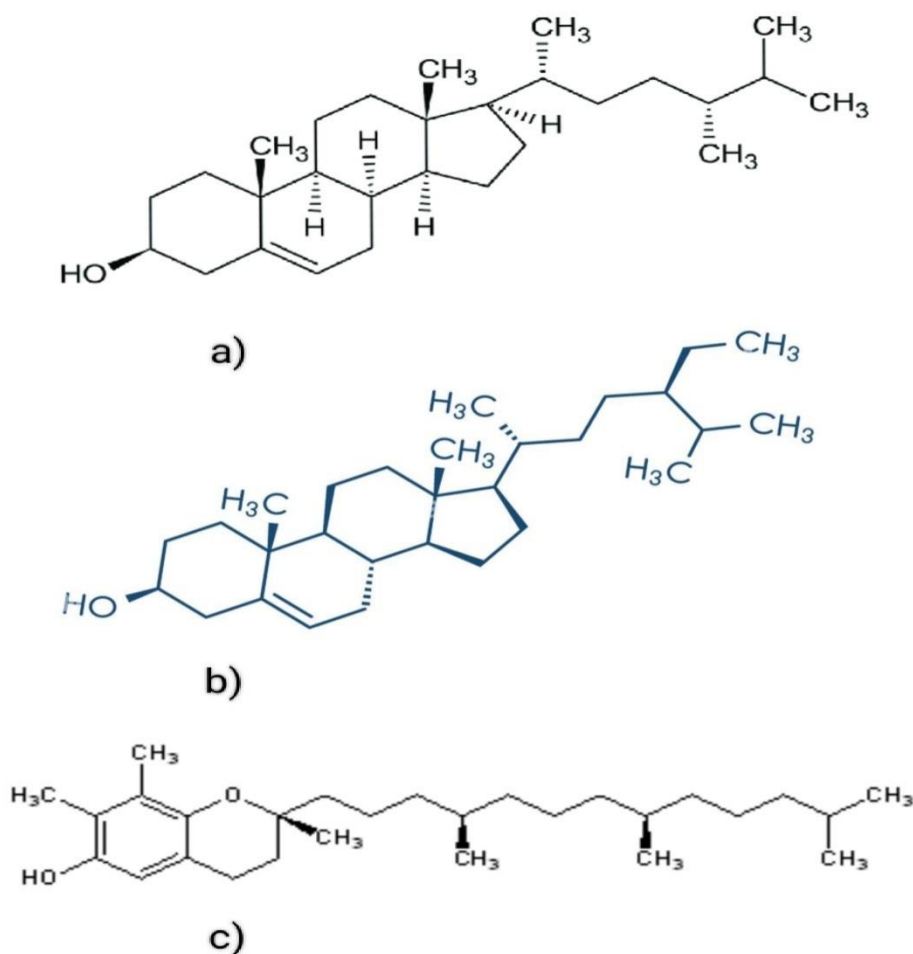


Figure 20 : la structure chimique de : a) campesterol, b) β -sitostérol et c) γ -tocophérol

(<https://images.app.goo.gl/SMg6Zk3QAvuhFz3b7>; <https://images.app.goo.gl/Nt1V1NJjVuchX4s5>; <https://images.app.goo.gl/nJ5ts4gm27KwVvc69>).

II.4.3 Teneur en polyphénols, flavonoïdes, caroténoïdes et chlorophylle de l'huile de pépins de figue de Barbarie

D'après une analyse effectuée par **Brahmi et al., (2020)** en Algérie, qui a extrait de l'huile de graines à partir de trois types de plantes, à savoir : *Pistacia lentiscus* L (lentisque)(PL), *Opuntia ficus indica* (L.) Mill (figuier de Barbarie) (*Ofi*) .et *Argania spinosa* L (arganier)(AS).

Les huiles ont été extraites par méthode d'extraction pression à froid, il a été démontré que l'huile d'AS contenait une teneur significativement plus élevée en phénols totaux ($79,21 \pm 1,31$ mg équivalent gallique (GAE) / 100 g d'huile), suivie par l'huile de graines d'*Ofi* ($55,82 \pm 3,84$ mg GAE / 100 g d'huile). L'huile de graines de PL est la plus pauvre en ces composés ($25,15 \pm 1,01$ mg GAE / 100 g d'huile). Le résultat dans le **tableau IV**.

Tableau IV : Concentrations antioxydantes des huiles de graines de *Pistacia lentiscus* L. (PL), *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (OFI) et *Argania spinosa* L. (AS) (**Brahmi et al., 2020**).

	PL	OFI	AS
Chlorophylls (mg/kg)	16.66 ± 1.20^a	5.66 ± 0.60^b	ND
Carotenoids (mg/kg)	1480.0 ± 5.1^a	65.5 ± 2.3^c	124.6 ± 3.4^b
Total phenolics (mg GAE/100 g)	25.15 ± 1.01^c	55.82 ± 38.40^b	79.21 ± 1.31^a
Total flavonoids (mg (QE/100 g)	16.08 ± 1.15^b	3.08 ± 0.51^c	34.35 ± 7.60^a

(Équivalent GAE : Équivalent Acide Gallique ; Équivalent QA : Équivalent Quercétine ;

ND : Non détecté).

Un résultat comparable a été observé dans une étude réalisée en Grèce par **karabagias et al., (2020)** concernant PPSO en utilisant le n-hexane avec un appareil Soxhlet. Le rendement obtenu était de $55,1 \pm 0,300$ mg d'équivalents d'acide gallique pour 100 mL.



CHAPITRE III
Activités biologiques
des huiles végétale

III.1. Activité antioxydants

III.1.1 Stress oxydatif

De plus en plus de preuves montrent que le stress oxydatif chez les organismes vivants résulte d'un déséquilibre entre la production de molécules hautement réactives, telles que les espèces réactives de l'oxygène (ROS), les espèces réactives de l'azote (ARN) et les espèces réactives du soufre (ARS), et la capacité du système de défense antioxydant endogène, à les neutraliser.

Ce déséquilibre entraîne des dommages aux structures cellulaires, affectant des molécules essentielles comme les lipides, les protéines et l'ADN. Ces perturbations contribuent au développement et à l'aggravation d'un large éventail de pathologies.

Les espèces réactives sont constamment générées dans les cellules à de faibles concentrations, résultant de processus métaboliques normaux tels que la respiration cellulaire dans les mitochondries. Cependant, leur production peut également être augmentée par des facteurs externes, notamment les rayonnements (rayons X et UV), l'ozone, les polluants atmosphériques, la fumée de cigarette, les agents pathogènes (bactéries, virus), et certains médicaments.

Elles peuvent être présentes sous forme radicalaire (radicaux libres) ou non radicalaires. Elles sont généralement instables en raison de la présence d'électrons non appariés sur leur orbite électronique externe (Vona *et al.*, 2021).

Tableau V: Liste des espèces réactives de l'oxygène, de l'azote et du soufre (Martemucci et al., 2022).

Espèces réactives de l'oxygène (ROS)		Espèces réactives de l'azote (RNS)		Espèces réactives du soufre (RSS)	
Nom	Symbole	Nom	Symbole	Nom	Symbole
Radicaux					
Oxygène (bi-radical)	$O_2^{\cdot\cdot}$	Oxyde nitrique	NON^{\cdot}	Radical thiyle S^{\cdot}	RS^{\cdot}
Hydroxyle	$\cdot OH$	Dioxyde d' azote	$N^{\cdot} 2^{\cdot}$		
Hydroperoxyde	HO_2^{\cdot}	Radical nitrate	$N^{\cdot} 3^{\cdot}$		
Carbonate	$CO_3^{\cdot-}$				
Peroxyde	ROO^{\cdot}				
Alcoxyde	RO^{\cdot}				
Radical de dioxyde de carbone	$CO_2^{\cdot-}$				
Non-radicaux					
peroxyde d'hydrogène	H_2O_2	Cation nitrosyle	NON^+	Sulfure d'hydrogène	H_2S
Ozone	O_3	acide nitreux	HNO_2	Disulfure	$RSSR$
Oxygène singulet	$^1 O_2$	Anion nitroxyde	NON^-	Disulfure-S-monoxyle	$RS(O)SR$
acide hypobromeux	$HOBr$	trioxyde de diazote	N_2O_3	Disulfure-S-dioxyde	$RS(O)_2SR$
acide hypochloreux	$HOCl$	Tétroxyde de diazote	N_2O_4	acide sulfénique	$RSOH$
Acide hypoiodéux	HOI	Pentoxyde de diazote	N_2O_5	Thiol/sulfure	RSR
Peroxydes organiques	$ROOH$	Peroxynitrites d'alkyle	$ROONO$		
Peroxynitrite	$ONOO^-$	Peroxynitrates d'alkyle	RO_2ONO		
peroxynitrate	O_2NOO^-	Chlorure de nitryle	NO_2Cl		
acide peroxynitreux	$ONOOH$	Nitrate de peroxyacétyle	$\begin{matrix} CH_3 \\ C(O)OONO_2 \end{matrix}$		
Peroxomono-carbonate	$HOOCO_2^-$				
Monoxyde de carbone	CO				

III.1.2 Antioxydants

Antioxydants ont défini comme toute substance qui retarde, prévient ou supprime les dommages oxydatifs d'une molécule cible (Vona et al., 2021).

Les antioxydants se divisent en deux catégories : endogènes et exogènes (Figure 18). Les antioxydants endogènes incluent des enzymes telles que la superoxyde dismutase (SOD), la catalase (CAT), la glutathion peroxydase (GPx) et la glutathion réductase (GRx), ainsi que des composés non enzymatiques comme l'acide lipoïque, le glutathion, la L-arginine, l'acide urique, la bilirubine et certains nutriments antioxydants. Les antioxydants exogènes, quant à eux, ne peuvent pas être synthétisés par l'organisme et doivent être apportés par l'alimentation. Parmi eux figurent la vitamine E, la vitamine C, des oligo-éléments (Se, Cu, Zn, Mn) et des

composés phytochimiques comme les isoflavones, les polyphénols et les vonoïdes. Ces antioxydants, qu'ils soient endogènes ou exogènes, agissent comme des piègeurs efficaces de radicaux libres. En cédant des électrons aux espèces réactives de l'oxygène (ROS), ils neutralisent leurs effets néfastes, réduisant ainsi le stress oxydatif et l'oxydation des molécules cellulaires (Martemucci *et al.*, 2022). (figure 21).

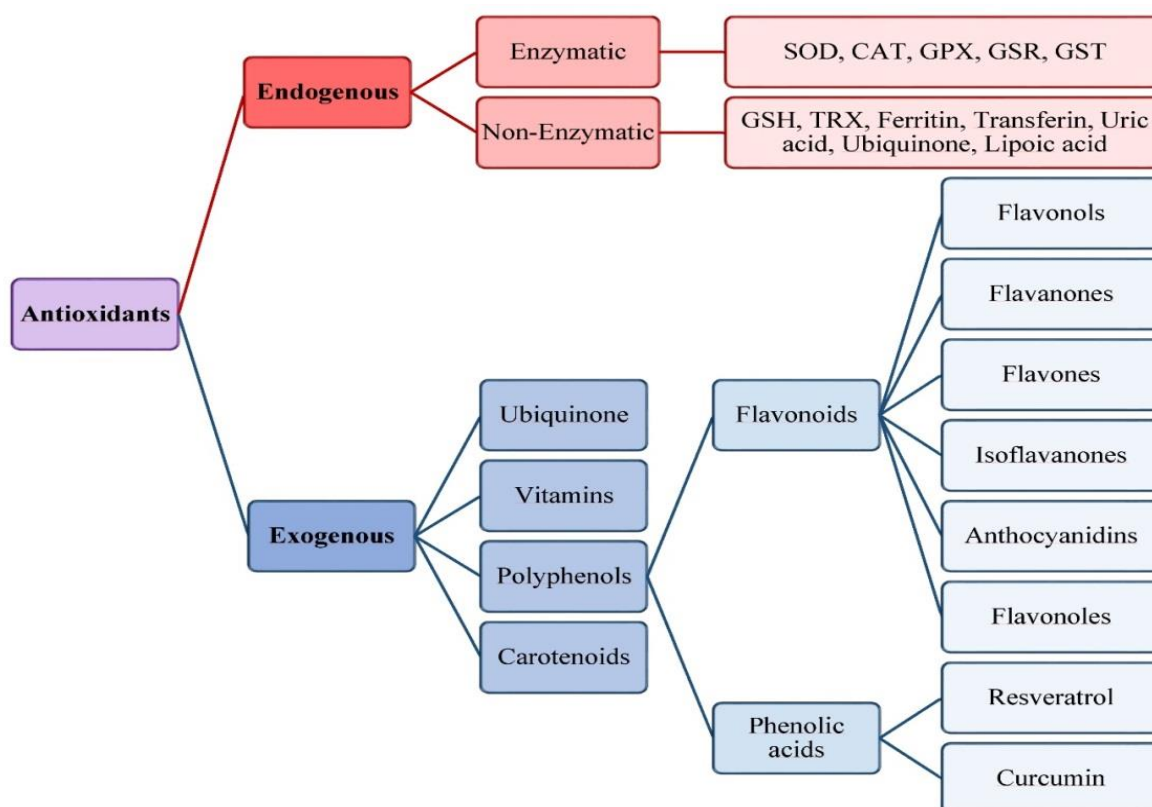


Figure 21 : Schéma des antioxydants endogènes et exogènes. SOD, superoxyde dismutase ; CAT, catalase ; GPX, glutathion peroxydase ; GSR, glutathion réductase ; GST, glutathion transférase (Vona *et al.*, 2021).

Ces dernières années, l'intérêt pour les extraits végétaux en tant que source majeure d'antioxydants exogènes a considérablement augmenté. Leur innocuité et leurs effets thérapeutiques potentiels sur la santé ont attiré une attention particulière. Parmi ces extraits, le PPSO suscite un intérêt croissant en raison de ses propriétés bénéfiques. Des études révèlent qu'il possède une activité biologique prometteuse, avec divers effets positifs sur la santé.

En se basant sur l'étude de Ghanemi *et al.*, (2022), l'huile a été extraite à l'aide de n-hexane dans un appareil de Soxhlet pendant une durée de 8 heures. L'activité antioxydante a été évaluée en utilisant la méthode de piégeage des radicaux libres DPPH (2,2-diphényl-1-

picrylhydrazyle). Les résultats ont révélé que le PPSO possède une activité antioxydante particulièrement élevée. Plus précisément, les flavonoïdes présents dans les fractions d'acétate et de n-butanol ont démontré une inhibition des radicaux libres dépassant 90 % à une concentration de 0,5 mg/ml. Les valeurs d'IC₅₀, qui indiquent l'efficacité antioxydante, étaient respectivement de 0,089 mg/ml pour la fraction d'acétate et de 0,063 mg/ml pour la fraction de n-butanol. Ces valeurs se rapprochent de celles de l'acide ascorbique, un antioxydant de référence, ce qui confirme l'efficacité remarquable du PPSO en tant qu'agent antioxydant.

Comme le montre l'étude de **Khémiri et al., (2019)**, l'huile de figue de barbarie (PPSO), extraite par pression à froid, a démontré une efficacité remarquable dans la prévention et le traitement des lésions gastriques induites par l'éthanol chez le rat. Grâce à sa richesse en composés bioactifs, cette huile protège la muqueuse gastrique en agissant de manière synergique ou retardée pour optimiser la cicatrisation. Son mécanisme d'action repose notamment sur ses propriétés antioxydantes, évaluées par des tests standardisés. Ainsi, le test de piégeage du radical DPPH a révélé un pouvoir neutralisant de 88,41 % (exprimé en équivalent vitamine C/g d'huile), tandis que celui du radical ABTS (2,2'-azinobis-3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonate) a confirmé une activité antioxydante de 87,42 %. Ces résultats soulignent le potentiel thérapeutique du PPSO dans la protection contre les dommages oxydatifs, contribuant ainsi à la restauration de la barrière gastrique. Cette étude met en lumière l'intérêt des principes actifs naturels dans la prise en charge des pathologies ulcéreuses, ouvrant des perspectives prometteuses pour des applications pharmacologiques ou nutraceutiques.

III.2 Activité antimicrobienne

Face à l'émergence croissante de microorganismes résistants aux antibiotiques, la recherche de nouveaux agents antimicrobiens suscite un intérêt majeur. La résistance aux traitements conventionnels et les effets indésirables des composés synthétiques soulignent l'urgence de développer des alternatives plus sûres.

Dans ce contexte, les plantes médicinales offrent une piste prometteuse grâce à leur richesse en antioxydants naturels (polyphénols, flavonoïdes, tanins, etc.), connus pour leurs propriétés antimicrobiennes. Leur intégration dans les protocoles thérapeutiques pourrait compléter, voire remplacer partiellement, les antibiotiques classiques, ouvrant ainsi la voie à des traitements plus durables et mieux tolérés (**Aissani, 2022 ; Derbak, 2024**).

III.2.1 Processus d'action antimicrobiennes

Le mécanisme d'action des antimicrobiens est complexe et multifactoriel, impliquant diverses stratégies pour neutraliser les micro-organismes. Parmi celles-ci figurent l'inhibition des enzymes microbiennes, la privation de substrats essentiels à leur croissance ou encore la fixation à des métaux comme le fer, ce qui perturbe leur métabolisme. D'autres actions incluent l'altération de la paroi cellulaire, la disruption de la membrane cytoplasmique entraînant la fuite des composants cellulaires ainsi que l'interférence avec la synthèse de l'ADN, de l'ARN, des protéines et des lipides. Ces mécanismes peuvent cibler plusieurs voies métaboliques simultanément ou résulter d'interactions indirectes. L'efficacité des antimicrobiens varie en fonction du type de micro-organisme et de la structure de leur membrane externe (Derbak, 2024).

III.2.2 Activité antimicrobienne de l'huile végétale de figue de Barbarie

conformément à la recherche de Khémiri et al., (2019), l'activité antimicrobienne de l'huile végétale (PPSO) originaire de Tunisie a été évaluée contre dix micro-organismes pathogènes pour l'homme. Parmi eux figuraient quatre souches bactériennes (*Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus agalactiae* et *Enterobacter cloacae*), trois levures (*Candida albicans*, *Candida parapsilosis* et *Candida sake*) et trois champignons filamenteux (*Aspergillus niger*, *Penicillium digitatum* et *Fusarium oxysporum*). Les tests ont été réalisés avec une dose de 50 µL de PPSO, incubée à 28 °C pendant 24 heures pour les bactéries, 48 heures pour les levures et 3 à 4 jours pour les champignons. Les résultats ont révélé une activité antibactérienne significative contre *Enterobacter cloacae*, ainsi qu'une action inhibitrice sur les levures *Candida Parapsilosis* et *Candida sake*. En revanche, aucune efficacité n'a été observée contre *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus agalactiae* et *Escherichia coli*. Par ailleurs, l'huile a démontré une activité antifongique contre les trois moisissures opportunistes testées (*Penicillium*, *Aspergillus* et *Fusarium*), suggérant un potentiel thérapeutique contre les infections cutanées fongiques.

III.3 Activité anti-inflammatoire

III.3.1 Inflammation

L'inflammation est une réaction naturelle de l'organisme face à une agression externe, telle qu'une infection ou une blessure (Mansour, 2015).

Elle joue un rôle crucial dans la neutralisation des agents pathogènes et la réparation des tissus lésés. on trouve deux types :

- **L'inflammation aiguë** : une réponse immédiate et de courte durée (quelques heures à quelques jours) faisant partie de l'immunité innée.
- **L'inflammation chronique** : qui s'installe lorsque l'agression persiste ou en cas de immunitaire, pouvant s'étendre sur des mois ou des années (Mayouf, 2019).

III.3.2 Anti-inflammatoires

Les anti-inflammatoires sont des médicaments couramment utilisés en médecine pour réduire l'inflammation et ses symptômes (Kherbache, 2023). On les classe principalement en deux catégories :

- **Anti-inflammatoires non stéroïdiens (AINS)**

Les AINS agissent en bloquant les enzymes cyclooxygénases (COX-1 et COX-2), responsables de la production de prostaglandines, des médiateurs clés de l'inflammation. (Ferdjioui, 2020). Leur capacité à soulager la douleur, la fièvre et l'inflammation explique leur large utilisation (Mouffouk, 2019). Parmi les AINS les plus prescrits figurent l'aspirine, l'ibuprofène, le diclofénac et le célécoxib (Boungou-Tsona, 2023).

- **Anti-inflammatoires stéroïdiens (AIS)**

Les AIS, dérivés du cortisol, comprennent à la fois des hormones naturelles et des molécules de synthèse. Leur action puissante en fait des traitements de choix pour les inflammations sévères et les maladies auto-immunes (Boungou-Tsona, 2023).

- **Anti-inflammatoires d'origine végétale**

De nombreuses plantes contiennent des composés anti-inflammatoires, tels que les polyphénols et les flavonoïdes, capables d'inhiber les voies de la COX et de la lipoxygénase.

Ces substances naturelles offrent des alternatives intéressantes aux médicaments synthétiques. (Mouffouk, 2019).

D'après les recherches de Bardaa et al., (2020), qui a évalué les effets anti-inflammatoires topiques et antioxydants des huiles de *Cucurbita pepo* (courge), *Linum usitatissimum* (lin) et *Ofi* par rapport à un anti-inflammatoire de référence (« Inflocine® », 2 mg/patte), un médicament non stéroïdien, sur l'inflammation aiguë induite par la carragénine chez des rats Wistar mâles adultes. L'inflammation a été provoquée par l'administration de 100 µL d'une solution fraîchement préparée de carragénine à 1 % dans la patte arrière droite de chaque rat. Les résultats ont montré une réduction significative de la taille de l'œdème dans le groupe

traité à l'huile par rapport à tous les autres groupes. L'huile PPSO a démontré la meilleure activité anti-inflammatoire, corrélée à sa composition exceptionnelle en tocophérols, stérols végétaux et acides gras insaturés. Ces composés agissent comme de puissants inhibiteurs en bloquant les cyclooxygénases (COX), réduisant ainsi la synthèse des prostaglandines pro-inflammatoires.



CHAPITRE IV
Huiles essentielles

IV. Huiles essentielles

IV.1 Définition

Le terme « huile essentielle ou essence végétale » est employé depuis le XVII^e siècle, nommé par Paracelse von Hohenheim de Suisse. Divers chercheurs ont tenté de définir les huiles essentielles comme étant un mélange complexe de molécules organiques liposolubles volatiles, du fait de leur masse moléculaire relativement faible ce qui est à la base de leur propriétés olfactives (**Martins, 2020 ; Nebie, 2023 ; Vora et al., 2023**).

Selon La pharmacopée européenne définit une huile essentielle comme : « un produit odorant, généralement de composition complexe, obtenu à partir d'une matière première végétale botaniquement définie, soit par entraînement à la vapeur d'eau, soit par distillation sèche, ou par un procédé mécanique approprié sans chauffage. Elles sont ensuite séparées de la phase aqueuse par un procédé physique n'entraînant pas de changement significatif de sa composition. » (**Nebie, 2023**).

Les huiles essentielles se retrouvent dans diverses familles botaniques, largement présentes dans le règne végétal, et sont produites en quantité notable par environ 2000 espèces.

Ces essences aromatiques sont synthétisées par des glandes sécrétrices situées sur presque toutes les parties de la plante. Elles peuvent être stockées dans les fleurs, les feuilles, les écorces, le bois, les racines, les rhizomes, les fruits ou encore les graines.

Chez une même espèce végétale, les huiles peuvent être présentes dans différents organes, et leur composition chimique peut varier en fonction de l'organe concerné (**Chekoual, 2019**).

IV.2. Les procédés d'extraction des huiles essentielles

IV.2.1 Méthodes conventionnelles

IV.2.1.1 Hydrodistillation

L'hydrodistillation est une technique aisée et économique qui permet de récolter les huiles essentielles par la distillation d'un mélange non miscible (Nebie, 2023). La méthode d'hydrodistillation, une technique traditionnelle encore largement utilisée, consiste à chauffer un mélange de plantes et d'eau dans un ballon jusqu'à ébullition. La chaleur entraîne la rupture des cellules végétales, libérant des molécules aromatiques qui sont ensuite transportées par le courant de vapeur. Après leur condensation dans un système de refroidissement, l'huile essentielle est extraite et recueillie dans un essencier (Mohamadi, 2023). (figure 22).

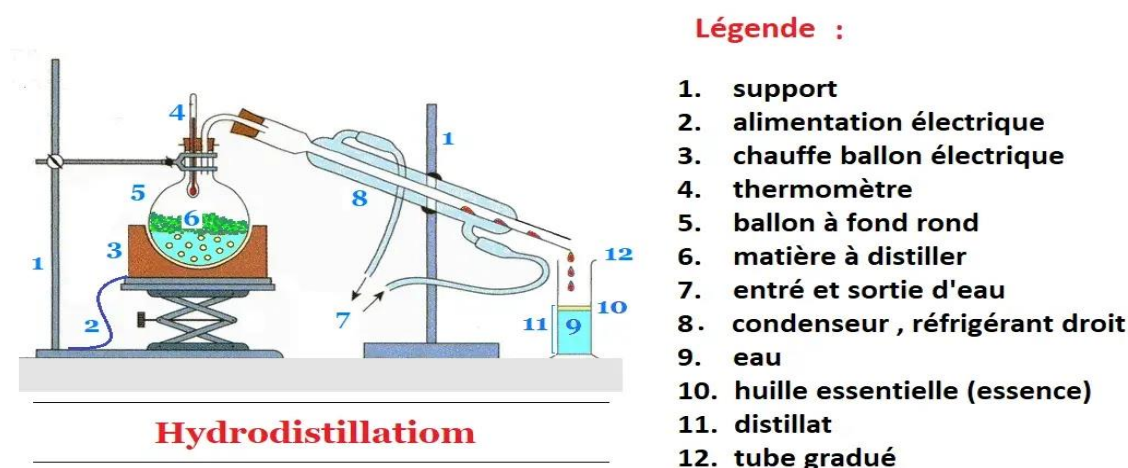


Figure 22 : Appareillage utilisé pour l'hydrodistillation de l'huile essentielle.

<https://images.app.goo.gl/pQKYhoputjbZsJTW9>.

IV.2.1.2 Expression à froid

On emploie cette technique précisément pour isoler les substances volatiles contenues dans les péricarpes des agrumes en procédant à leur déchirement (Boukhatem et al., 2019). Cette méthode repose sur la rupture physique (pression, incision ou Abrasion à froid) des contenants qui renferment l'huile essentielle. Cette dernière, en association avec l'eau cellulaire, sera ultérieurement séparée par décantation ou centrifugation (Nebie, 2023). (figure 23).

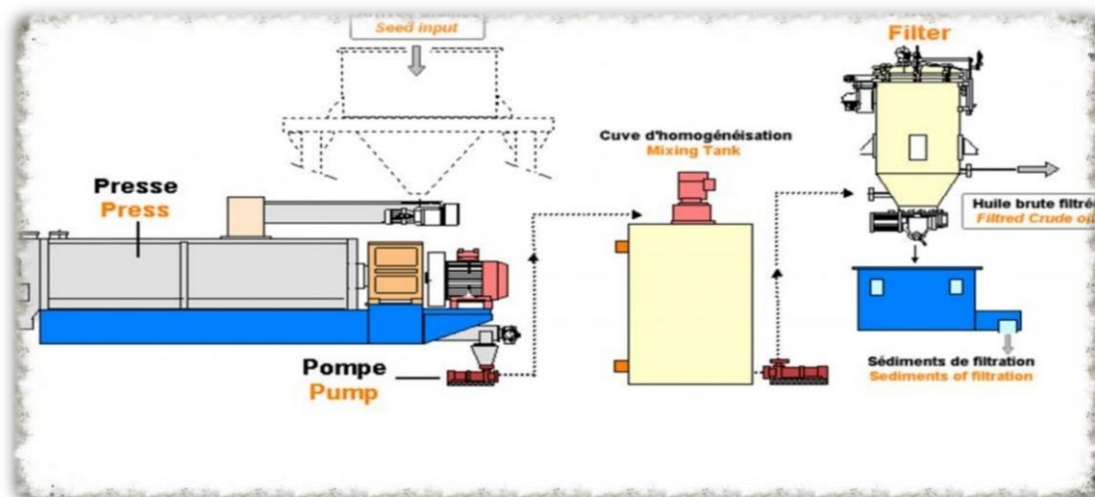


Figure 23 : Montage d'extraction par l'expression à froid (Benchiekh, 2017).

IV.2.1.3 Extraction par Entraînement à la vapeur d'eau

Contrairement à l'hydrodistillation, qui permet un contact direct entre la matière végétale et l'eau, la technique de la vapeur d'eau évite tout contact direct. Cette méthode implique le passage de la vapeur d'eau à travers des plantes disposées sur une grille (Chekoul, 2019).

La séparation se fait par décantation suite à la condensation, cette méthode optimise la qualité des huiles essentielles (Bensouda, 2018). (figure 24).

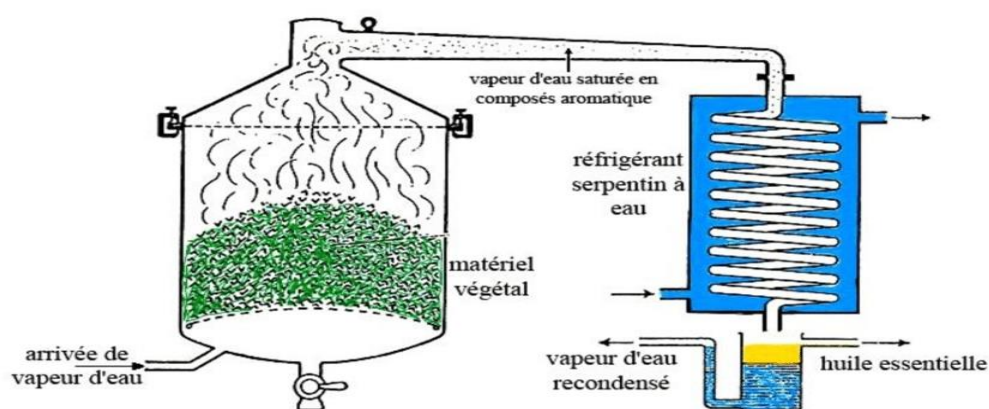


Figure 24 : Entraînement à la vapeur d'eau (Chekoul, 2019).

<tps://images.app.goo.gl/4BzWz95NSTgweBmf9>.

IV.2.2 Méthodes innovantes

IV.2.2.1 Extraction assistée aux ultrasons

L'extraction végétale est rendue plus efficace par l'usage des ultrasons, grâce à la cavitation, un processus où les bulles créées rendent les cellules plus vulnérables, favorisant ainsi la libération des composés, pour optimiser le rendement, il est crucial de modifier des paramètres comme la fréquence, la puissance de durée, la température, l'étalement des ondes est le type de solvant (Saada, 2023). (figure 25).

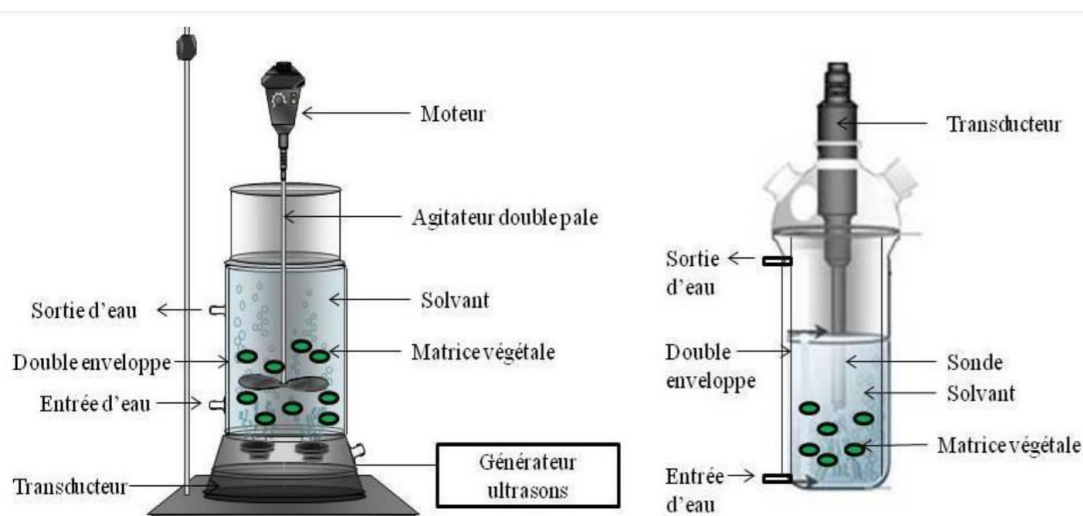


Figure 25 : Montage d'extraction assistée aux ultrason (Mnayer, 2014).

IV.3 Composition chimique des huiles essentielles

Les huiles essentielles sont des mélanges complexes de molécules volatiles aux structures hétérogènes. Ces composants sont, pour certains, des hydrocarbures ne contenant que des éléments carbone (C) et hydrogène (H), tandis que d'autres contiennent également de l'oxygène (O), et sont alors souvent appelés composés oxygénés (Matera et al., 2023 ; Ben Miri, 2025).

De façon quasi exclusive, On distingue principalement deux grandes familles, caractérisées par des origines biogénétiques distinctes :

Le groupe des terpènes, qui sont des hydrocarbures naturels à structure cyclique ou linéaire. Leur formule brute est $(C_5H_8)_n$, où n désigne le nombre de motifs de base appelés isoprènes (ou 2-méthylbuta-1,3-diène). Ainsi, selon la valeur de n , on distingue : Les monoterpènes ($n = 2$), Les sesquiterpènes ($n = 3$), Les diterpènes ($n = 4$), etc. À cette famille s'ajoutent les terpénoïdes, ou terpènes oxygénés, qui appartiennent à différentes classes chimiques telles que : phénols, alcools, aldéhydes, cétones, éthers, esters, oxydes et lactones. Ils peuvent

représenter plus de 90 % de la composition des huiles essentielles et confèrent aux plantes leur profil olfactif caractéristique. (figure 26).

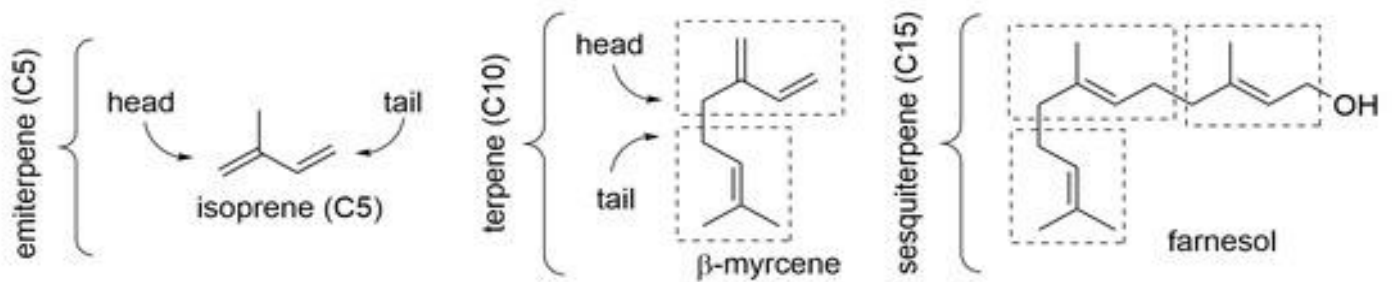


Figure 26 : Caractéristiques structurales des terpènes volatils et des terpénoïdes dans les huiles essentielles

(Matera et al., 2023).

La deuxième groupe sont des composés aromatiques dérivés du phénylpropanoïdes, beaucoup moins fréquent (Matera et al., 2023 ; Ben miri,2025). (figure 27).

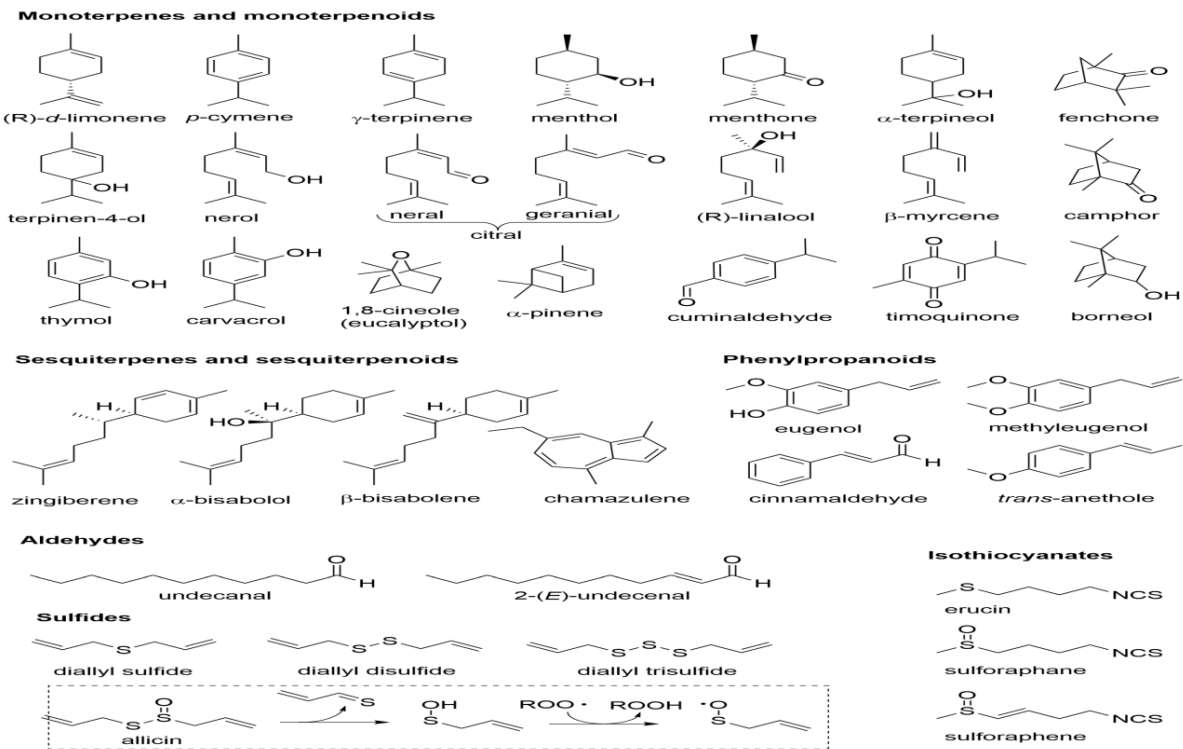


Figure 27 : Exemples de composants HE typiques classés par famille structurale (Matera et al., 2023).

IV.4. Les activités biologiques des huiles essentielles

IV.4.1 Activité antioxydante

Un antioxydant est une substance (naturelle ou synthétique) qui, même à de faibles concentrations, protège les cellules en inhibant l'oxydation des substrats vulnérables. Il agit en neutralisant les radicaux libres, atténuant ainsi leurs effets nuisibles sur l'organisme ; Ces composants jouent un rôle crucial en inhibant ou en empêchant les dégradations oxydatives, ce qui contribue à préserver l'intégrité des systèmes biologiques (Bounab, 2020).

Le pouvoir antioxydant des huiles essentielles est directement lié à la totalité de leur contenu en phénols (Bouhaddouda, 2016).

IV.4.2 Activité antimicrobienne

Avant d'aborder l'effet des huiles essentielles sur les microbes, il convient d'examiner de plus près la structure de la paroi cellulaire des bactéries Gram-positives et Gram-négatives. (figure28).

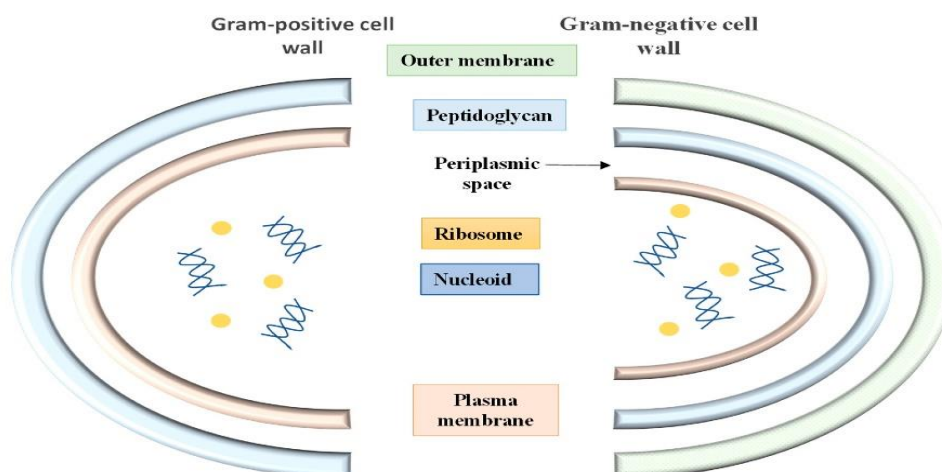


Figure 28 : Représentation schématique de la paroi cellulaire bactérienne Gram-positif et Gram-négatif (Angane, M et al., 2022).

Les bactéries Gram-positives sont généralement plus sensibles aux composés des huiles essentielles, en raison de leur paroi cellulaire constituée d'une épaisse couche de peptidoglycane associée à des molécules hydrophobes. En revanche, les bactéries Gram-négatives possèdent une enveloppe cellulaire plus complexe, comprenant une membrane externe qui les rend plus résistantes à ces composés. Toutefois, cette explication reste hypothétique, car plusieurs études n'ont pas observé de différence significative entre les deux types de bactéries. Même si la membrane externe des bactéries à Gram négatif est généralement imperméable aux composés hydrophobes, certains peuvent néanmoins la

traverser grâce à des canaux spécifiques appelés porines. Ainsi, certains composés présentes dans les huiles essentielles sont plus actives contre les bactéries Gram-positives, tandis que d'autres ciblent davantage les bactéries Gram-négatives (Angane, M et al., 2022).

De plus, Le mode d'action des huiles essentielles repose principalement sur la perturbation de la membrane cellulaire bactérienne, augmentant sa perméabilité et provoquant la fuite de composants intracellulaires essentiels. Cela entraîne une diminution du potentiel membranaire, affecte les pompes à protons et la synthèse d'ATP, entraînant une déplétion énergétique. Cette perturbation provoque aussi des effets secondaires sur les organites intracellulaires, menant à la mort cellulaire (Ben Miri, 2025). (figure 29).

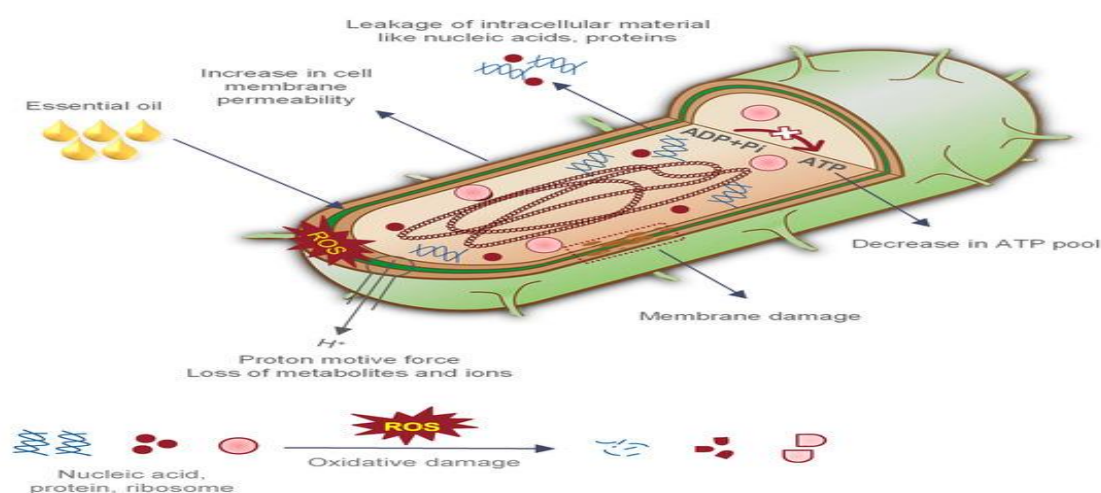


Figure 29 : Mécanisme antibactérien des huiles essentielles (HE). (Angane, M et al., 2022).

IV.4.3 Activité anti-inflammatoire

Une huile essentielle est une substance aromatique et volatile extraite par distillation, hydrodistillation, vapeur sèche ou méthode mécanique. Malgré sa production en petite quantité, elle possède des caractéristiques exploitées dans les domaines de la nutrition, de la cosmétique et de la pharmacie (Miguel, 2010).

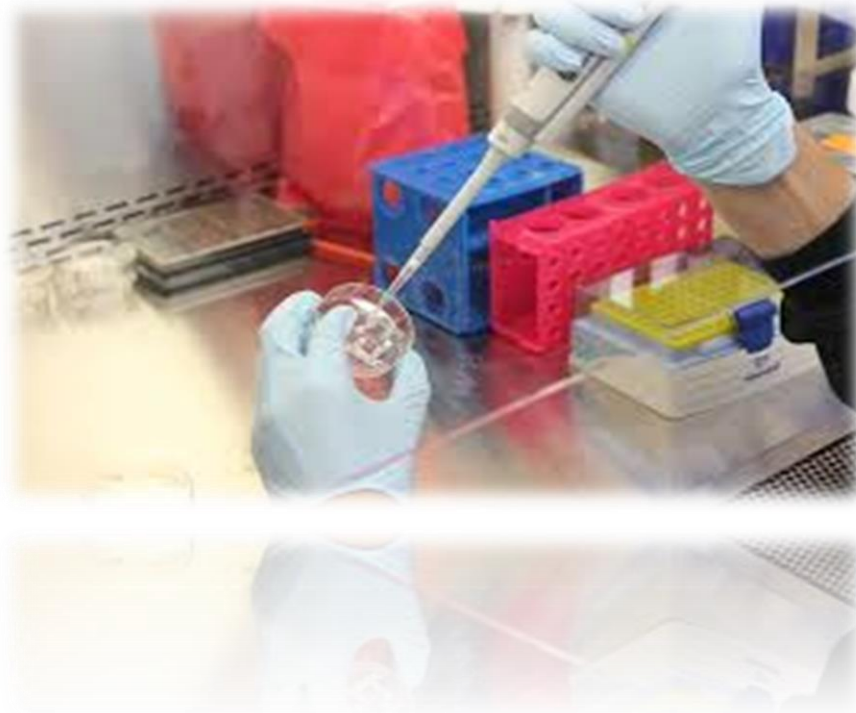
L'inflammation est considérée comme une réponse physiologique essentielle, à l'origine des symptômes de plusieurs maladies chroniques, y compris les maladies auto-immunes.

De nombreuses plantes sont fréquemment employées avec les huiles essentielles (HE) grâce à leurs remarquables vertus anti-inflammatoires (Pereira, R et al., 2023).



Partie II

Matériel et méthodes



✓ Objectifs de travail

Ce travail vise à mener une étude comparative entre l'huile végétale extraite des graines d'*Opuntia ficus indica* et l'huile essentielle commercialisée issue des cladodes de la même plante, en mettant l'accent sur l'évaluation de leurs activités biologiques, notamment antioxydante, antimicrobienne et anti-inflammatoire, in vitro.

L'étude se déroulera en deux principales étapes :

1. Extraction de l'huile végétale à partir des graines par Soxhlet et utilisation de l'huile essentielle commercialisée à base de cladodes.
2. Évaluation comparative des activités biologiques des deux huiles à travers des tests standardisés :

✓ Tests antioxydants :

- Etude de pouvoir antioxydant de l'huile végétale de graines d'*Opuntia ficus-indica* et l'huile essentielle commercialisée par la méthode de DPPH (1,1-diphényl-di-picrylhydrazyl).

✓ Tests antimicrobiens:

- Etude de l'activité antimicrobienne par méthode de diffusion sur gélose (en puits) vis-à-vis quelques souches microbiennes.

✓ Tests anti-inflammatoires :

Etude de l'activité anti-inflammatoires par deux tests :

- Test d'hémolyse
- Test de stabilisation membranaire par la chaleur.

Ce travail a été réalisé au niveau de laboratoire pédagogique de Département De Biologie de l'Université Belhadj Bouchaïb (Aïn Témouchent).

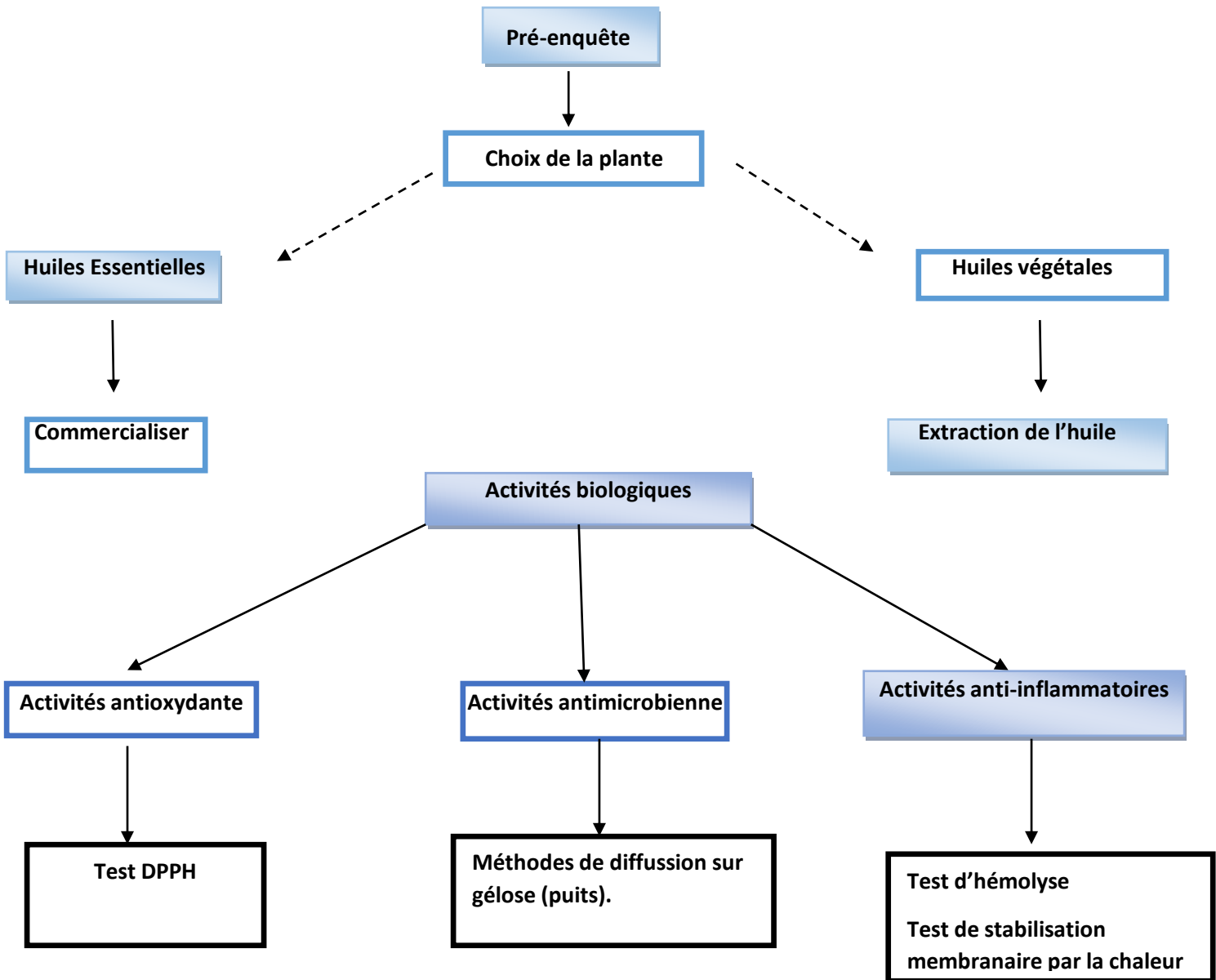


Figure 30 : Schéma récapitulatif du protocole expérimental.

II.1 Préparation des huiles Essentielles

II.1.1 Matériel végétal :

Le matériel végétal étudié est une huile essentielle commercialisée et une huile végétale provenant de la plante *d'Opuntia ficus indica* extrais à partir des graines de figuier de barbarie par la méthode d'extraction de Soxhlet, récoltée dans l'ouest de l'Algérie. (figure 31), (figure 32).



Figure 31 : L'huile essentielle.



Figure 32 : région d'acheté.

II.2. Méthodes d'Extraction de l'huile végétale

II.2.1. Montage de Soxhlet

Le montage de Soxhlet permet l'extraction de composés d'une matière végétale placée dans une cartouche poreuse. Le solvant, chauffé dans un ballon, s'évapore, se condense, puis s'accumule autour de la cartouche avant d'être siphonné vers le ballon, répétant ainsi plusieurs cycles jusqu'à épuisement du soluté. Dans une application pratique, l'extraction à partir de graines a été réalisée à l'aide de ce dispositif, en utilisant de l'hexane comme solvant. Environ 10 g d'échantillon d'*Ofi* solide, placés dans une cartouche de cellulose, ont été soumis à une extraction continue par reflux avec 300 mL de solvant pendant 8 heures, Le solvant et l'huile extraite ont finalement été séparés par évaporation sous pression réduite à 45°C (Louar, 2019 ; Bouaouich, et al., 2023).

II.3 Evaluation des activités biologiques

II.3.1 Evaluation de l'activité anti-radicalaire par la méthode du DPPH

Le radical « 1,1-diphényl-2-picrylhydrazyle (DPPH) », découvert il y a un siècle par Goldschmidt et Renn en 1922, est largement utilisé comme méthode bio analytique pour évaluer l'activité antioxydante de molécules pures, d'extraits végétaux ou de composés phénoliques. Ce radical stable en conditions standard (température ambiante et présence d'air) présente une couleur violette intense due à la présence d'un électron non apparié sur l'atome d'azote. Sa structure chimique, illustrée dans la Figure 22, lui confère une réactivité spécifique vis-à-vis des donneurs d'hydrogène, tels que les antioxydants (Gulcin et Alwasel, 2023). (figure 33).

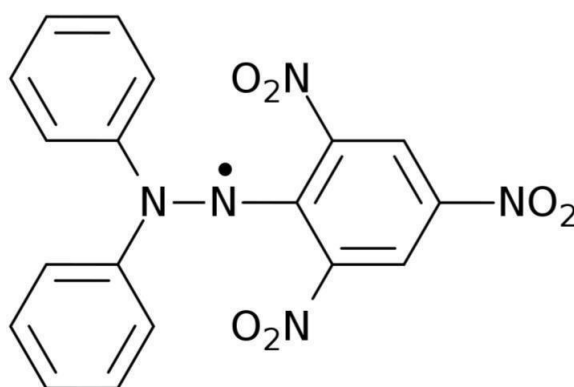


Figure 33: La structure chimique d'un radical 1,1-diphényl-2-picrylhydrazil (DPPH).

(<https://images.app.goo.gl/4eJcGZdL6d1YgsY3A>)

II.3.1.1 Test DPPH

Le test au DPPH (2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle) est une méthode spectrophotométrique largement utilisée pour évaluer la capacité antioxydante d'un composé par sa réactivité vis-à-vis des radicaux libres. Ce radical stable, de couleur violette, présente une absorption caractéristique dans le visible à 517 nm.

Lorsqu'un antioxydant est ajouté, il transfère un atome d'hydrogène au DPPH•, réduisant ce dernier en hydrazine (DPPH-H). Cette réaction s'accompagne d'une décoloration progressive (du violet au jaune pâle), traduisant la disparition de la bande d'absorption du DPPH•. La diminution de l'absorbance à 517 nm, mesurée par spectrophotométrie UV- visible, est directement proportionnelle à l'activité antioxydante de l'échantillon testé. (figure 34).

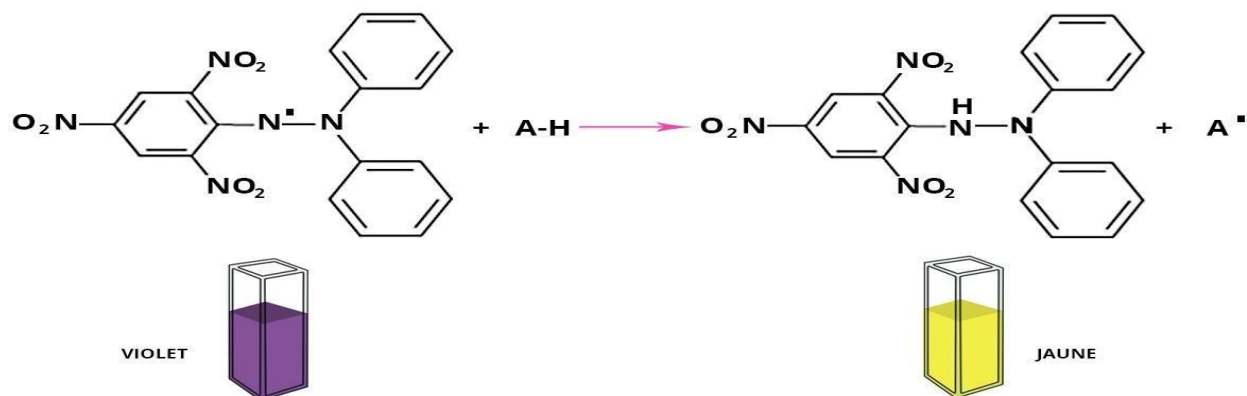


Figure 34 : Mécanisme de réaction de 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl (DPPH).

(<https://images.app.goo.gl/F5LNsZLKpNgBKVdP9>)

II.3.1.2 Mode opératoire

L'activité antioxydante des huiles (végétales et essentielle) d'*Ofi* a été évaluée in vitro à l'aide du Test (DPPH) proposée par **Brand- williams et al., (1995)** avec des modifications.

Une solution standard de DPPH a été préparée en dissolvant 3,5mg de DPPH dans 100mL de méthanol. Parallèlement, 100 mg de chaque échantillon d'huile ont été dissous dans 10 mL de méthanol, puis une série de sept dilutions successives a été réalisée pour chaque extrait.

Pour le test, 2 mL de la solution de DPPH ont été mélangés avec 2 mL des extraits méthanoliques des huiles dans des tubes à essai, obtenant un volume final de 4 mL. Un contrôle négatif a été préparé en remplaçant l'extrait par 2 mL de méthanol pur. Les mélanges ont été agités, incubés à l'obscurité pendant 30 minutes à température ambiante, puis l'absorbance a été mesurée à 517 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV- visible.

L'acide ascorbique a été utilisé comme standard de référence, suivant le même protocole, afin de comparer l'efficacité antioxydante des échantillons. (**figure 35**).

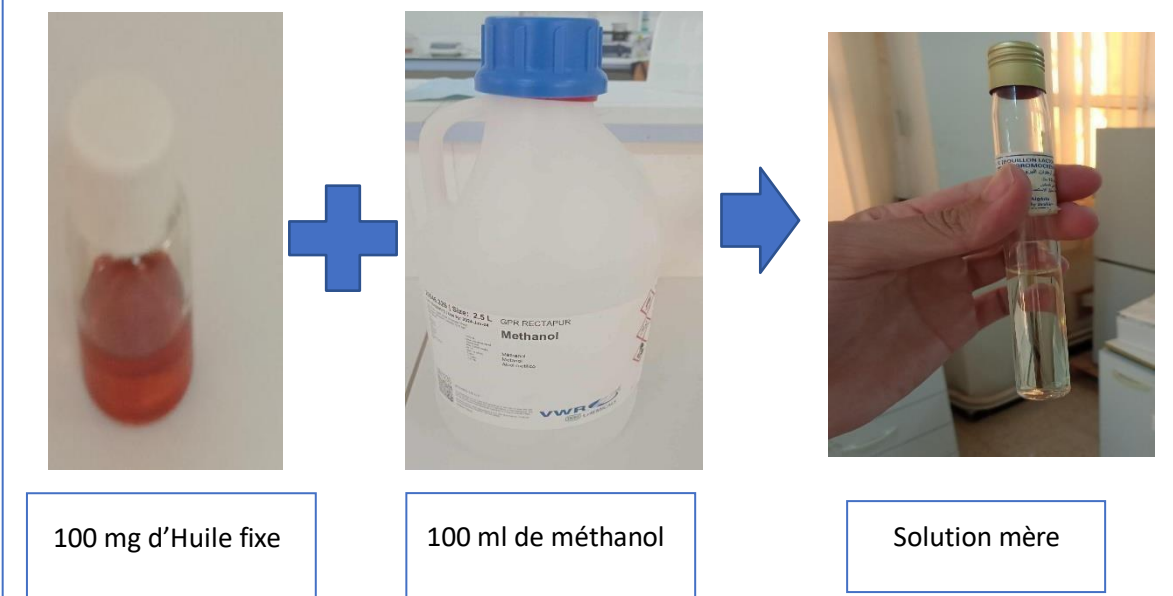
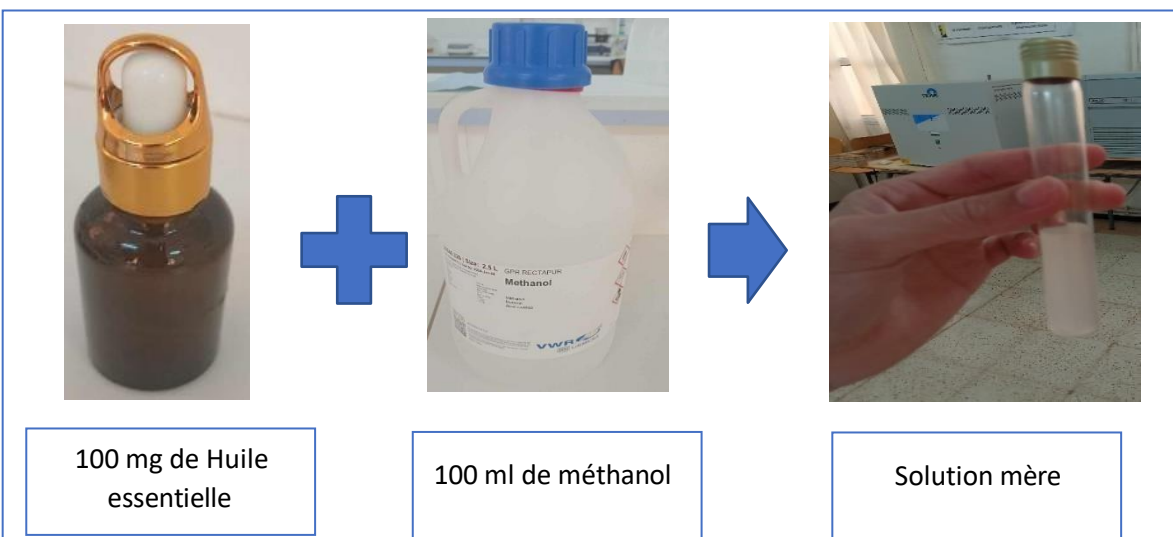
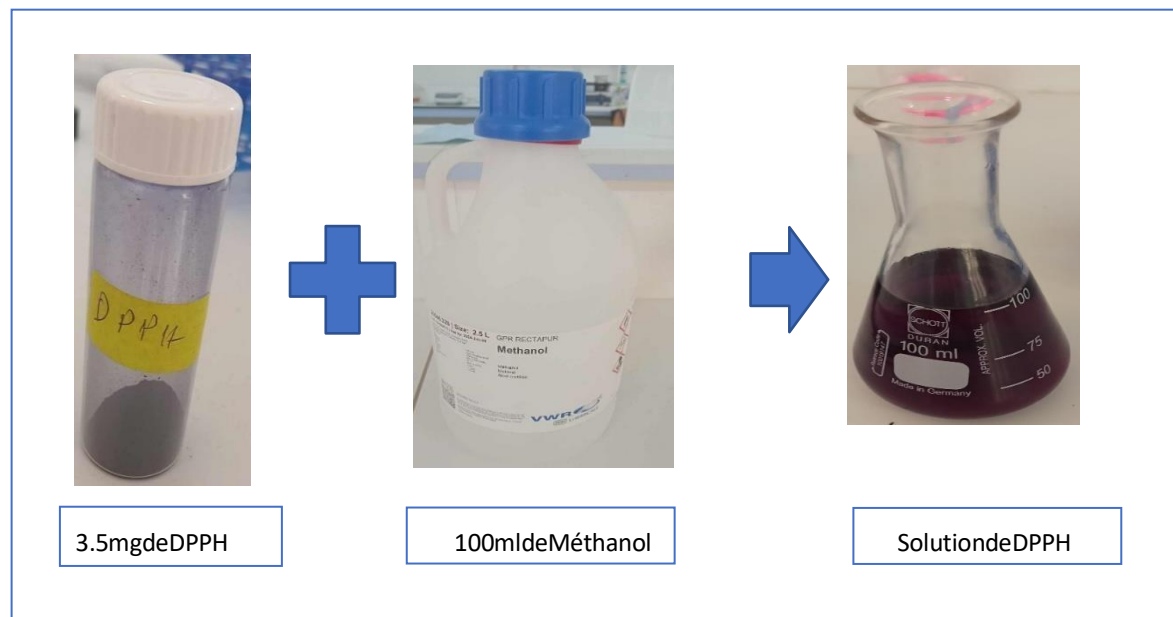


Figure 35 : Préparation de La solution mère (SM).

II.3.1.3 Expression des résultats

La capacité antioxydante de nos échantillons est exprimé en pourcentage d'inhibition du Radicale DPPH à l'aide de la formule suivante :

$$PI\% = \frac{(A \text{ contrôle} - A \text{ échantillon}) \times 100}{(A \text{ contrôle})}$$

PI%: Pourcentage d'inhibition de l'activité anti-radicalaire.

A contrôle: Absorbance du contrôle négatif.

A échantillon: Absorbance de l'échantillon.

Le graphique de la variation du pourcentage d'inhibition en fonction de la concentration des huiles (végétale et essentielle) d'*Ofi* permet de déterminer le IC_{50} correspondant à 50% d'inhibition et qui constitue l'activité antioxydant des huiles. Cette valeur est comparée à celle trouvée pour le composé de référence.

II.3.2 Evaluation de l'activité antimicrobienne

II.3.2.1 Souches microbiennes testées

Des tests antimicrobiens ont été réalisés sur une série de germes fréquemment impliqués dans diverses pathologies.

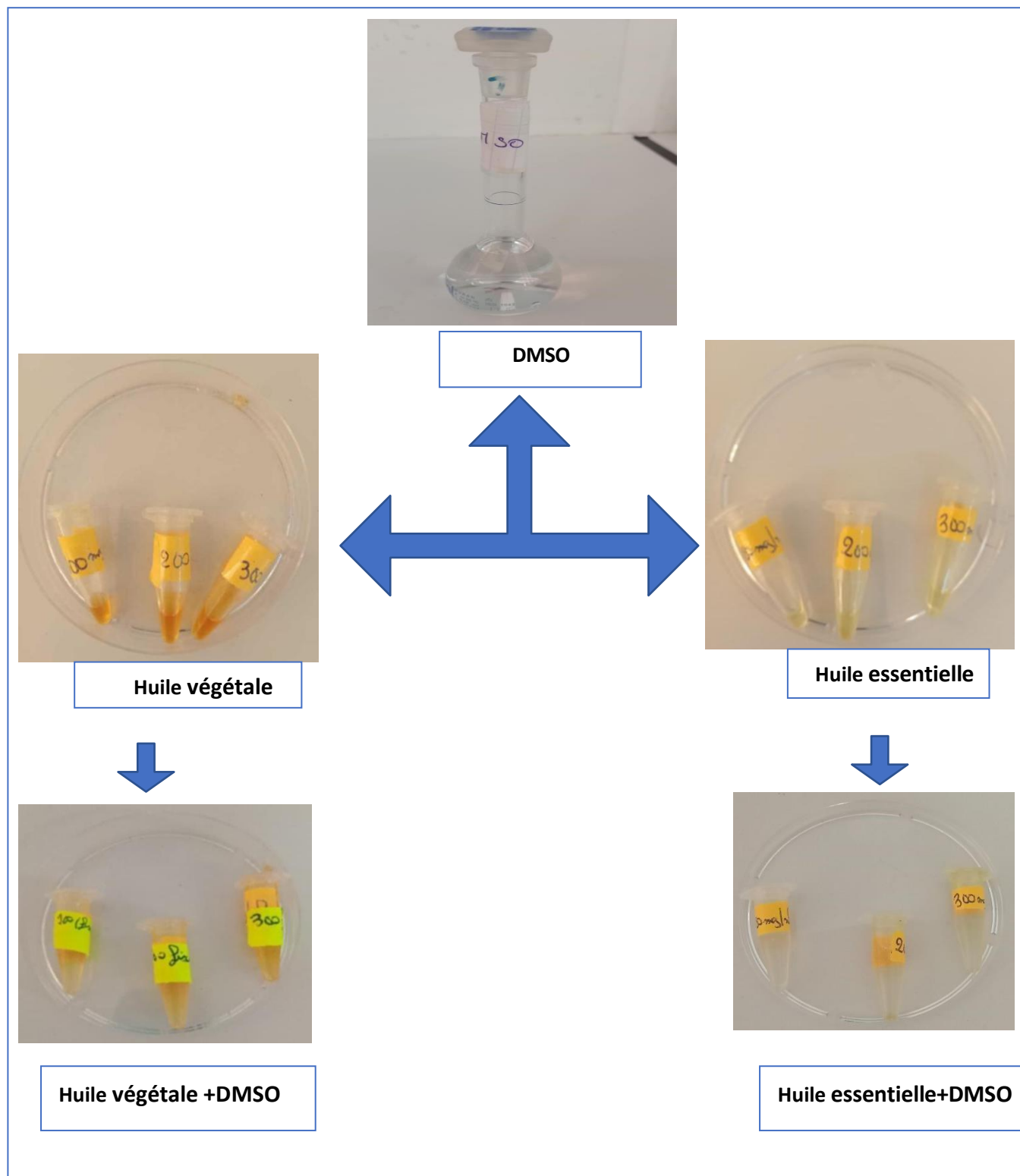
Cinq souches ont été sélectionnées appartiennent à la référence ATCC (**American Type Culture Collection**) : *Klebsiella pneumoniae*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* et *Escherichia coli*. Ainsi que sur une levure *Candida albicans*.

Tableau VI : les différentes souches bactériennes étudiées.

Etat frais	Souches	Gram
Bacille	<i>Escherichia coli</i> ATCC 25922	Négatif
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC 27853	
	<i>Klebsiella pneumoniae</i> ATCC 13883	
Cocci	<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 25922	Positif

II.3.2.2 Préparation des échantillons

Des solutions d'huile végétale et d'huile essentielle ont été préparées à trois concentrations différentes (100, 200 et 300 mg/mL) en les dissolvant dans du DMSO (1mL), suivies d'une homogénéisation par vortex.



II.3.2.3 Préparation de l'inoculum

Les suspensions microbiennes sont préparées à partir des souches préalablement repiquées sur Gélose Nutritive. On racle à l'aide d'un écouvillon quelques colonies bien isolées et identiques de chacune des souches microbiennes à tester, on décharge ensuite les écouvillons dans 9 ml d'eau physiologique stérile.

Après homogénéisation des suspensions, l'objectif est d'atteindre une opacité de 0.5 Mc Farland, équivalent d'une densité optique comprise entre 0.08 et 0.1 pour chaque souche qui a été mesurée à une longueur d'onde de 600 nm à l'aide de IMPLÉN OD600 DiluPhotometer. Il est noté que l'inoculum peut être ajusté en ajoutant, soit de la culture s'il est trop faible, ou bien d'eau physiologique stérile s'il est trop fort.



1-Prélèvement des colonies.



2-Mise en suspension dans un 9 ml d'eau physiologique stérile.



3-Vérifications de la turbidité à l'aide IMPLÉN OD600 DiluPhotometer.

II.3.2.4 Evaluation l'activité antimicrobienne par la méthode de Diffusion sur gélose

L'évaluation de l'activité antimicrobienne a été effectuée selon la méthode de Diffusion sur puits d'agar (AWDT: Agar Well Diffusion Test).

Comme pour la méthode de diffusion sur disque, la surface de la gélose est inoculée en étalant un volume d'inoculum microbien sur toute la surface. Ensuite, un puits de 6mm de diamètre est réalisé de manière aseptique à l'aide d'une pointe pipette, et un volume (20 μ L) des solutions d'huile fixe et d'huile essentielle ont été préparées à trois concentrations différentes (100, 200 et 300 mg/mL) dissous dans le DMSO (dimethyl sulfoxide) est déposé dans le puits. Les boîtes de gélose sont ensuite incubées dans des conditions adaptées pendant 24h à 30 °C pour les bactéries et 48h à 22°C pour les levures.

L'agent antimicrobien diffuse dans le milieu gélosé et inhibe la croissance de la souche microbienne évaluée, et l'activité antimicrobienne est déduite par la mesure des diamètres des zones d'inhibition entourant les puits. (**figure 36**).



Figure 36 : Méthode de diffusion sur gélose

II.3.2.5 Lecture des résultats

La lecture des résultats s'effectue par la mesure des diamètres d'inhibition à l'aide d'une règle graduée (en millimètres), qui se manifestent par une zone transparente correspondant à l'absence de croissance microbienne. Cette zone d'inhibition sera comparée à une échelle d'estimation de l'activité antimicrobienne (**Goudjil, 2016**).

Tableau VII : Les diamètres des zones d'inhibition (DZI) de la croissance microbienne.

Diamètres de la Zone d'inhibition (mm)	Transcription	Sensibilité du germe	Référence
<8	-	Résistant	(Goudjil, 2016).
9-14	+	Sensible	
15-19	++	Très sensible	
>20	+++	Extrêmement sensible	

II.3.3 Evaluation de l'activité anti-inflammatoire

II.3.3.1 Principe

L'inflammation représente une réponse physiopathologique à une lésion, une infection ou une destruction, caractérisée par la chaleur, la rougeur, la douleur et le gonflement (**Bouزيد, 2018**).

Il est possible d'étudier l'action anti-inflammatoire d'une huile *in vitro* en se servant des membranes des érythrocytes, qui partagent des similarités avec d'autres membranes cellulaires, y compris celles des lysosomes. Cela nous fournit des informations sur leur stabilisation en présence de cette huile à effet hémolytique (**Shobana et Vidhya, 2016**).

Dans ce travail, l'activité anti-inflammatoire *in vitro* est examinée à travers deux tests

Le test de stabilisation membranaire par la chaleur et le test d'hémolyse en se basant sur la méthode suivie par Shinde et ces collaborateurs (**Shinde et al., 1999**).

II.3.3.2 Préparation de la suspension érythrocytaire

Un individu en bonne santé n'ayant pas utilisé de médicaments anti-inflammatoires durant les 15 jours précédents a donné un échantillon sanguin (6 ml) au laboratoire de l'université Belhadj Bouchaïb d'Aïn Témouchent. Un échantillon de sang humain frais a été centrifugé à 3000 tours par minute pendant une durée de 10 minutes. Le surnageant obtenu a été éliminé, et le précipité a été récupéré. Ensuite, il a été rincé trois fois avec une solution de NaCl (0,9%), et reconstitué dans une solution tampon iso-saline (pH=7,4), à 40% (v/v). Nous avons évalué et reconstitué le volume de sang à 10% v/v de suspension en utilisant le tampon PBS (**Shinde et al., 1999**). (figure 37).

II.3.3.3 Test de stabilisation membranaire par la chaleur

Deux séries de tubes ont été incubées, l'une à 54 °C et l'autre à 0 °C, pendant 20 minutes. Le mélange réactionnel contenait 0,5 mL d'échantillon d'huile essentielle à tester (aux concentrations de 100 mg/mL), ainsi que d'échantillons d'huiles végétales de même concentration. Le volume a été complété avec 4,5 mL de tampon phosphate (pH 7,4), 30 µL d'une suspension de globules rouges à 40 %, et 0,5 mL d'éthanol, avec Diclofenac (AINS) utilisé comme témoin pour la comparaison entre les deux huiles (HE et HV).

- **Calcul du pourcentage d'inhibition**

$$\text{Pourcentage inhibition de l'hémolyse} = 100 \times \left(1 - \frac{\text{DO2} - \text{DO1}}{\text{DO2}' - \text{DO1}'}\right)$$

DO1 : Echantillon à 0°C.

DO2 : Echantillon à 54°C.

DO1' : Contrôle négative à 0°C.

DO2' : Contrôle négatif à 54°C.

II.3.3.4 Test d'hémolyse

L'analyse de l'impact de l'huile essentielle et de l'huile végétale sur les globules rouges a été effectuée en comparant deux types d'environnements : un tampon phosphate isotonique et un tampon hypotonique (pH 7,4). Les tests ont été effectués avec concentrations d'huile essentielle et d'huile végétale (100 et mg/mL) combinées à une suspension de globules rouges (40 %) ainsi qu'à de l'éthanol. Un contrôle non stéroïdien (AINS) de Diclofenac. Suite à une incubation suivie d'une centrifugation, le niveau d'hémolyse a été déterminé en vérifiant l'absorbance des surnageants à 540 nm.

- **Calcul du pourcentage d'inhibition**

$$\text{Pourcentage inhibition de l'hémolyse} = 100 \times \left(1 - \frac{\text{DO2} - \text{DO1}}{\text{DO2}' - \text{DO1}'}\right)$$

DO1 : Echantillon traité par la solution hypotonique.

DO2 : Echantillon traité par la solution isotonique.

DO1' : Contrôle négative traité par la solution hypotonique.

DO2' : Contrôle négatif traité par la solution isotonique

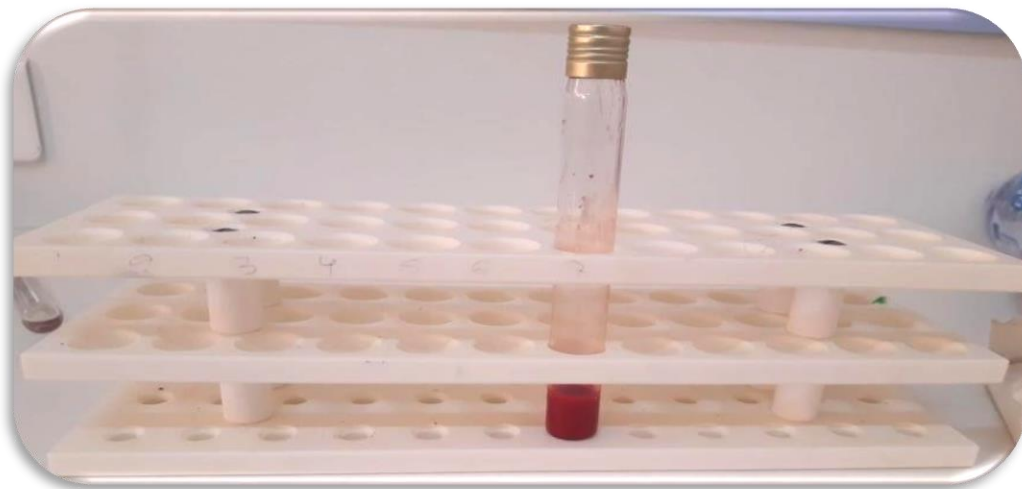


Figure 37: Préparation de la suspension érythrocytaire.



Partie III

Résultats et discussion



III. Les activités biologiques

III.1. Évaluation de l'activité antioxydante

Comme indiqué précédemment, le stress oxydatif résulte d'un déséquilibre entre un excès de molécules réactives et une faible défense endogène chez les organismes vivants, entraînant des dommages aux macromolécules telles que les acides nucléiques, les lipides et les protéines. Ce phénomène contribue ainsi à la pathogénèse d'un large éventail de maladies, comme la cancérogenèse, l'athérosclérose, les troubles gastro-intestinaux...etc (**Vona et al., 2021**).

Actuellement, les chercheurs travaillent d'arrache-pied pour trouver de nouvelles substances antioxydantes alternatives visant à renforcer ces défenses endogènes. Dans ce contexte, une tendance croissante vise à remplacer les antioxydants synthétiques en raison de leurs effets toxiques par des antioxydants naturels. Ces derniers présentent non seulement une moindre toxicité, une biodégradabilité élevée et un mode d'action plus sûr, mais peuvent aussi être extraits d'espèces végétales sous-exploitées. L'huile *d'Ofi*, examinée dans ce travail, représente un cas idéal de ces sources riches en antioxydants (**Moussaoui, 2020 ; Gulcin et Alwasl, 2023**).

Afin d'évaluer de manière exhaustive et précise le potentiel antioxydant de l'huile *d'Ofi* in vitro dépendent non seulement de la source naturelle mais aussi des processus d'extraction et des méthodes d'évaluation. C'est notamment le cas du test au DPPH (2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle), occupe une place prépondérante dans la littérature en raison de ses avantages méthodologiques : sensibilité élevée, facilité de mise en œuvre et rapidité d'exécution.

L'activité de piégeage des radicaux DPPH est l'une des méthodes d'accréditation pour étudier l'activité antioxydante des extraits de plantes, car elle est reconnue comme étant simple, rapide et efficace en raison de la grande stabilité de ce radical dans des conditions de laboratoire, c'est-à-dire dans l'air et à température ambiante (**Gulcin et Alwasel., 2023**).

Comme illustré dans l'histogramme, L'acide ascorbique présente la meilleure activité antioxydante avec une IC50 de l'ordre de 1.22881 mg/ml , ce qui était attendu en raison de sa forte capacité à céder des électrons et à neutraliser les radicaux libres, conformément à son rôle d'antioxydant de référence, suivi par l'huile végétale de 2,7736 mg/ml et enfin de 4,107 mg/ml pour l'huile essentielle.

Ces résultats montrent que les deux échantillons (l'huile végétale et l'huile essentielle d'*Ofi*) présentent une capacité de piéger le radical DPPH. Mais nous remarquons que l'huile végétale a montré une activité antioxydante significativement plus élevée soit environ 1.5 fois plus active que l'huile essentielle. Cette différence notable suggère une composition phytochimique distincte entre les deux types d'extraits, avec probablement une teneur plus élevée en composés phénoliques et autres tocophérols, des dérivés de la vitamine E présents dans l'HV d'*Ofi*.

Une étude récente de **Bouhrim et al., (2021)** a montré que l'huile de graines de figes de Barbarie possède une forte teneur en γ -tocophérol, une forme majeure de vitamine E, ainsi qu'en polyphénols, expliquant ainsi sa stabilité et à son activité antioxydante élevée, ce qui corrobore nos observations sur la supériorité de l'huile végétale par rapport à l'huile essentielle.

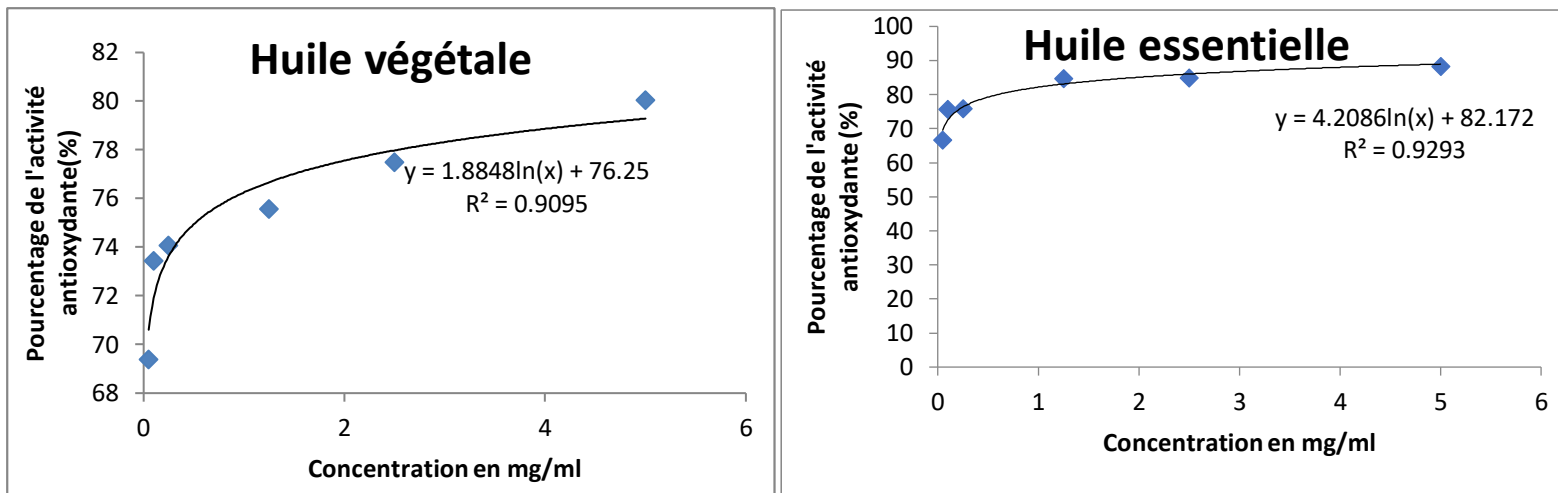
Ces composants bioactifs, connus pour leur fort potentiel antioxydant, agissent contre les effets nocifs des radicaux libres via deux mécanismes principaux. Premièrement, l'huile végétale (HV) d'*Ofi* exerce une activité antioxydante directe en donnant des électrons ou des atomes d'hydrogène aux radicaux libres, Deuxièmement, elle agit par chélation des métaux pro-oxydants, tels que les ions Fe^{2+} et Cu^{+} , qui catalysent la formation de radicaux hydroxyles ($\cdot OH$) via la réaction de Fenton (**Alqurashi et al., 2023 ; Gulcin et Alwasel., 2023**).

Cependant, la dernière étude d'**Alqurashi et al., (2023)** en Arabie Saoudite (à Tarif) a rapporté des IC50 plus bas pour l'huile végétale (0,042 mg/ml) par rapport à nos résultats. Cette divergence pourrait s'expliquer par l'origine de la plante et la méthode d'extraction (pression à froid vs. Extraction par Soxhlet utilisant un solvant comme le n-hexane), qui influencent grandement l'activité antioxydante.

Les huiles essentielles d'*Opuntia dillenii*, comme l'ont étudié **Elouazkiti et al., (2024)**, ont été extraites par distillation à la vapeur d'eau et analysées grâce à la chromatographie en phase gazeuse (GC). Les résultats ont montré une activité antioxydante notable, même si les informations sur son efficacité restent limitées. Ces résultats s'alignent avec nos propres découvertes concernant l'huile essentielle d'*Opuntia ficus-indica*, qui a révélé une activité antioxydante modérée, avec une valeur d'IC50 de 4,107 mg/ml selon le test DPPH. Cette variation dans l'activité pourrait être due à la composition chimique unique de notre extrait, qui n'a pas été obtenue dans des conditions de laboratoire contrôlés.

IC₅₀ = 2773.6 mg/ml

IC₅₀ = 4.107 mg/ml



IC₅₀ = 1.2881 mg/ml

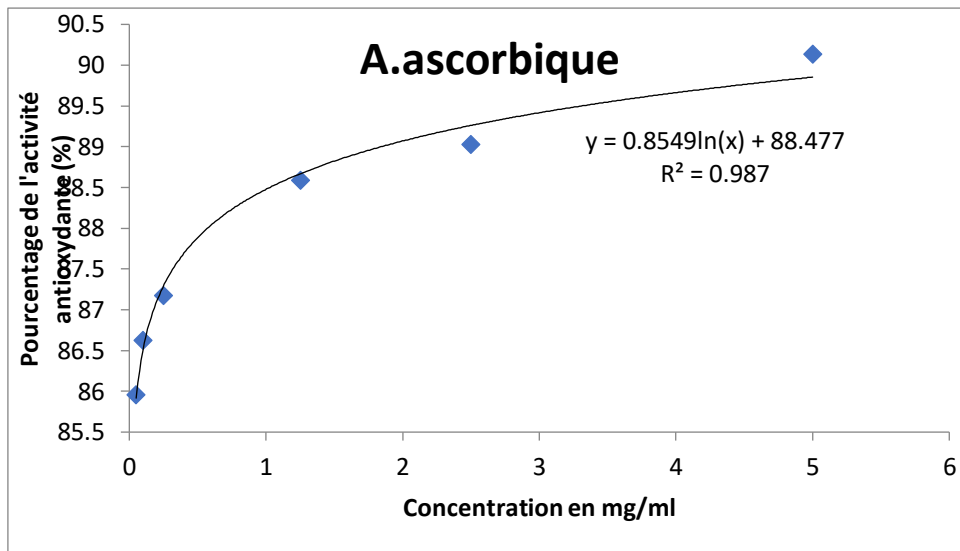


Figure 38 : Variation du pourcentage de l'activité antioxydante en fonction de la concentration d'huile essentielle, huile végétale et acide ascorbique.

Tableau VIII : Valeurs des IC₅₀ d'huile végétale, d'huile essentielle et A. Ascorbique.

Echantillons de la plante	Huile végétale	Huile essentielle	Acide Ascorbique
IC ₅₀	2.7736	4.107	1.2881

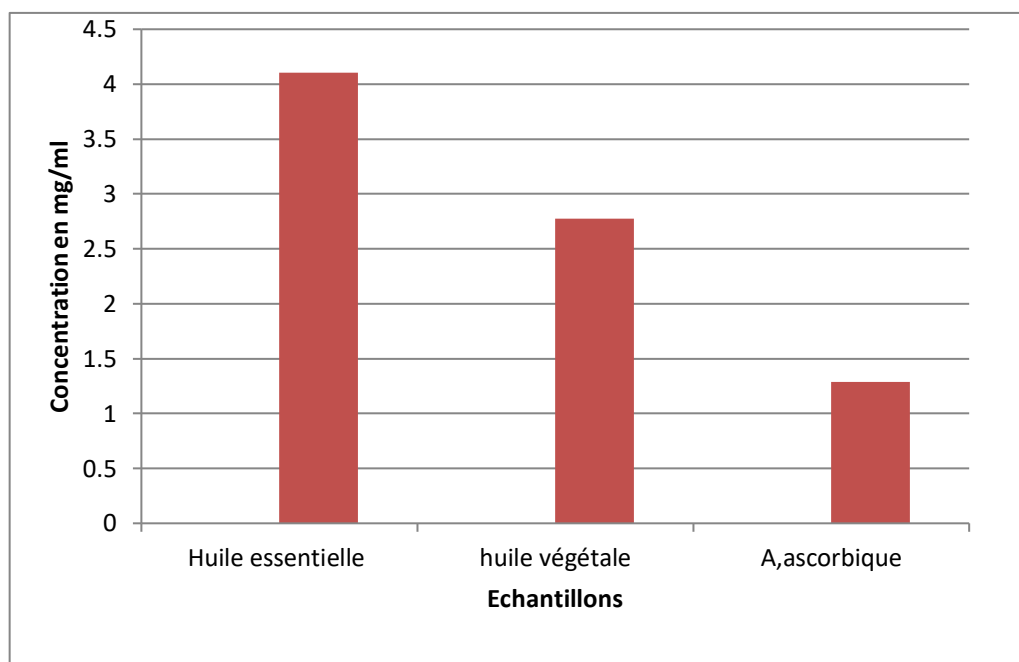


Figure 39 : Représentation graphique montre la comparaison entre les résultats de l'activité anti-oxydante d'huile végétale et d'huile essentielle de la plante d' *Opuntia ficus indica* avec l'A. Ascorbique.

III.2. Évaluation de l'activité antimicrobienne

Dans cette étude, nous avons évalué l'activité antimicrobienne des huiles essentielles et des huiles végétales de la plante *Opuntia ficus-indica* par la méthode de diffusion sur gélose, vis-à-vis de trois bactéries à Gram négatif : *Escherichia coli* ATCC 25922, *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853 et *Klebsiella pneumoniae* ATCC 13883, ainsi que d'une bactérie à Gram positif *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 et d'une levure *Candida albicans* ATCC 10231. Les résultats sont exprimés en diamètre d'inhibition (en millimètres, mm).

D'après les résultats illustrés, l'huile essentielle d'*OFI* ne manifeste aucune activité antimicrobienne contre *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* et *Candida albicans*. En revanche, les huiles végétales d'*OFI* démontrent une efficacité notable à partir de 200 mg/ml contre *P. aeruginosa*, *K. pneumoniae* et *S. aureus*, avec des zones d'inhibition maximales de 11 mm pour les deux premières souches et 10 mm pour la dernière.

Contrairement à cela, l'huile essentielle ne présente qu'une faible activité (7 mm de zone d'inhibition) contre *K. pneumoniae* à une concentration plus élevée (300 mg/ml). Ces observations soulignent les propriétés antimicrobiennes significatives des huiles végétales d'*OFI*, particulièrement vis-à-vis des bactéries à Gram négatif et positif, confirmant ainsi le potentiel thérapeutique de cette plante.

Selon l'étude **Khémiri et al., (2019)**, l'huile végétale extraite par pression à froid des graines d'*Ofi* en Tunisie contre quatre souches bactériennes (*Streptococcus agalactiae*, *Enterobacter cloacae*, ainsi que deux souches similaires à celles de notre étude, à savoir *Escherichia coli* et *Staphylococcus aureus*, les analyses ont révélé une activité antibactérienne limitée, n'agissant que sur *Enterobacter cloacae*, tandis qu'elle est restée inefficace contre les trois autres souches. Ces résultats divergent partiellement des nôtres, où un effet inhibiteur notable a été observé sur *S. aureus* à une concentration de 200 mg/mL.

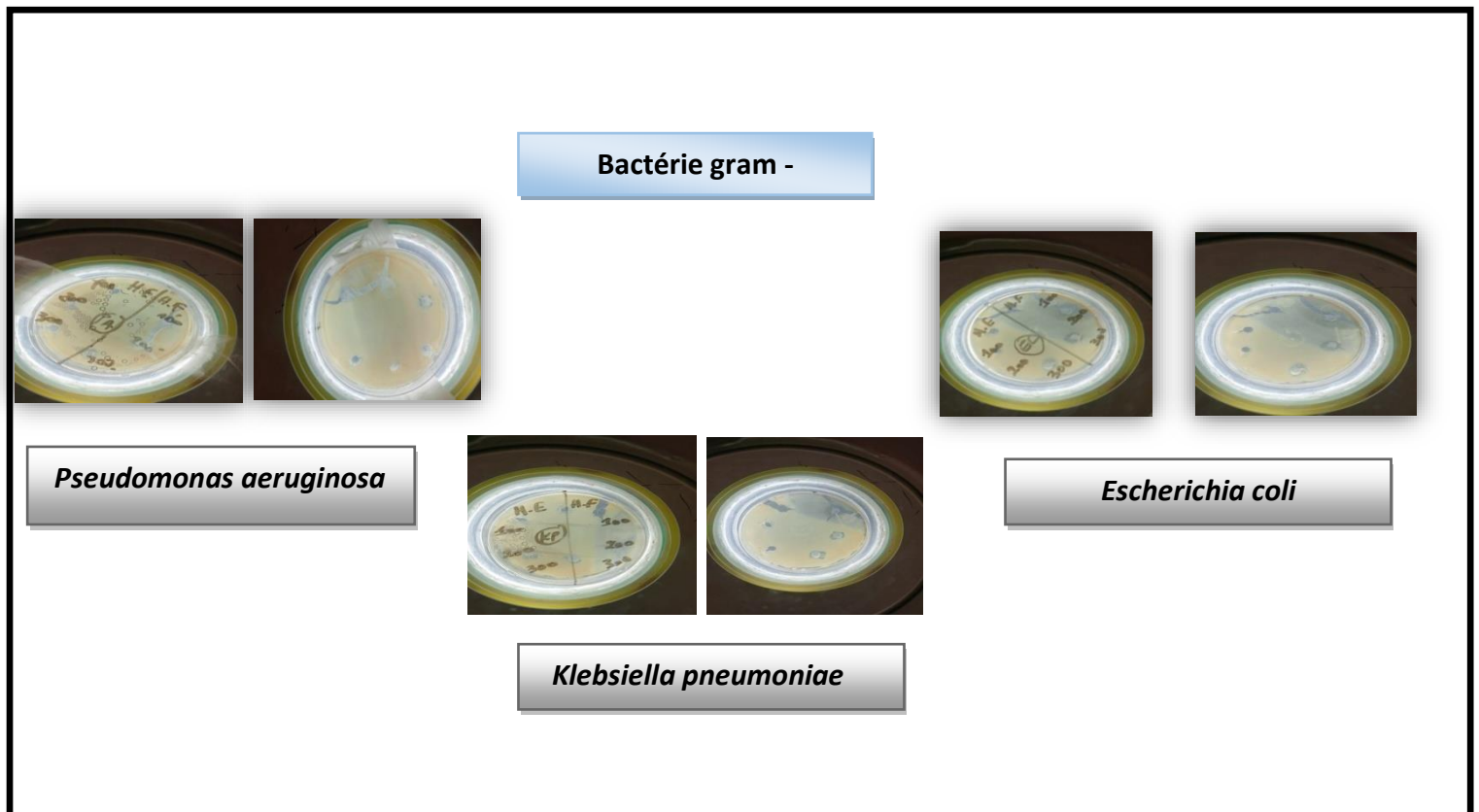
Les auteurs de cette étude proposent deux mécanismes d'action principaux pour expliquer l'effet de l'huile sur les pathogènes : premièrement, l'action des acides gras libres qui activeraient des enzymes auto lytiques de la paroi cellulaire bactérienne, entraînant une désorganisation de la bicouche phospholipidique membranaire. Cette perturbation se traduit par une réduction de l'absorption des nutriments, une inhibition de la croissance bactérienne, une augmentation de la perméabilité membranaire et une lyse cellulaire. Deuxièmement, par des phytostérols (notamment la bêta-sitostérol). Ces molécules interféreraient avec les stérols membranaires des bactéries, altérant leur perméabilité et perturbant les voies vitales cellulaires. Cette action pourrait induire une nécrose des cellules pathogènes. De plus, l'étude de **Ramírez-Moreno et al., (2017)**, qui a évalué l'activité antimicrobienne du PPSO extrait de deux variétés mexicaines (verte : *Opuntia albicarpa* et rouge : *Opuntia ficus-indica*), contre huit souches microbiennes, notamment *E. coli*, *S. aureus*, *P. aeruginosa* et *C. albicans*, est similaire à notre travail. Les résultats de cette dernière étude ont montré des zones d'inhibition microbienne pour la plupart des microorganismes, mais sont partiellement incompatibles avec nos résultats, qui n'ont révélé aucune activité contre *C. albicans* et *E. coli*.

Globalement, l'huile végétale d'*Ofi* a démontré des propriétés antimicrobiennes notables contre la plupart des souches microbiennes. Les différences entre les deux résultats peuvent s'expliquer par des facteurs influençant l'efficacité de cette huile, tels que les facteurs environnementaux (lumière, température, type de sol et nutriments), sans oublier les solvants et les méthodes d'extraction utilisés.

Les travaux de **Kiralam et al., (2021)** indiquent que les huiles essentielles constituent une fraction mineure dans certaines espèces du genre *Opuntia*. Dans cette perspective, nos résultats sur *Opuntia ficus-ndica* ont été comparés à d'autres espèces apparentées. Selon l'étude menée par **Moosazadeh et al., (2014)**, l'huile essentielle extraite des fruits de la plante *Opuntia stricta* F. a été analysée par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC-MS). Son activité antimicrobienne a été évaluée par la méthode

de diffusion sur disque contre plusieurs souches microbiennes, à savoir *Bacillus cereus* (PTCC 1015), *Bacillus licheniformis* (PTCC 1525), *Escherichia coli* (PTCC 1339), *Pseudomonas aeruginosa* (PTCC 1074) et *Candida albicans* (PTCC 5027). Les résultats ont révélé une activité antimicrobienne significative de l'huile essentielle sur l'ensemble des souches testées, ce qui a été attribué principalement à la présence de thymol comme composé majeur.

D'autre l'étude d'**Elouazkiti et al., (2024)** sur *Opuntia dillenii* rapporte une activité antimicrobienne significative, avec des diamètres d'inhibition de 11 mm pour *Pseudomonas aeruginosa*, 10 mm pour *Staphylococcus aureus* et 9 mm pour *Escherichia coli*. En revanche, ces trois souches n'ont montré aucune sensibilité dans nos tests, La divergence observée peut s'expliquer par plusieurs facteurs. Tout d'abord, il convient de souligner que l'huile essentielle utilisée dans notre étude n'a pas été extraite en laboratoire, mais commerciale. Cette différence est susceptible d'influencer la composition chimique de l'échantillon. En effet, les huiles essentielles commercialisées peuvent avoir subi des procédés de dilution, ce qui réduit la concentration des composés bioactifs, notamment ceux responsables de l'activité antimicrobienne. De plus, la variabilité naturelle des plantes, en fonction de leur origine géographique, des conditions de culture ou de la période de récolte, influe directement sur leur teneur en composants bioactifs. Cela pourrait également justifier la différence d'activité entre notre échantillon et celui utilisé dans l'étude de **Elouazkiti et al., (2024)**.



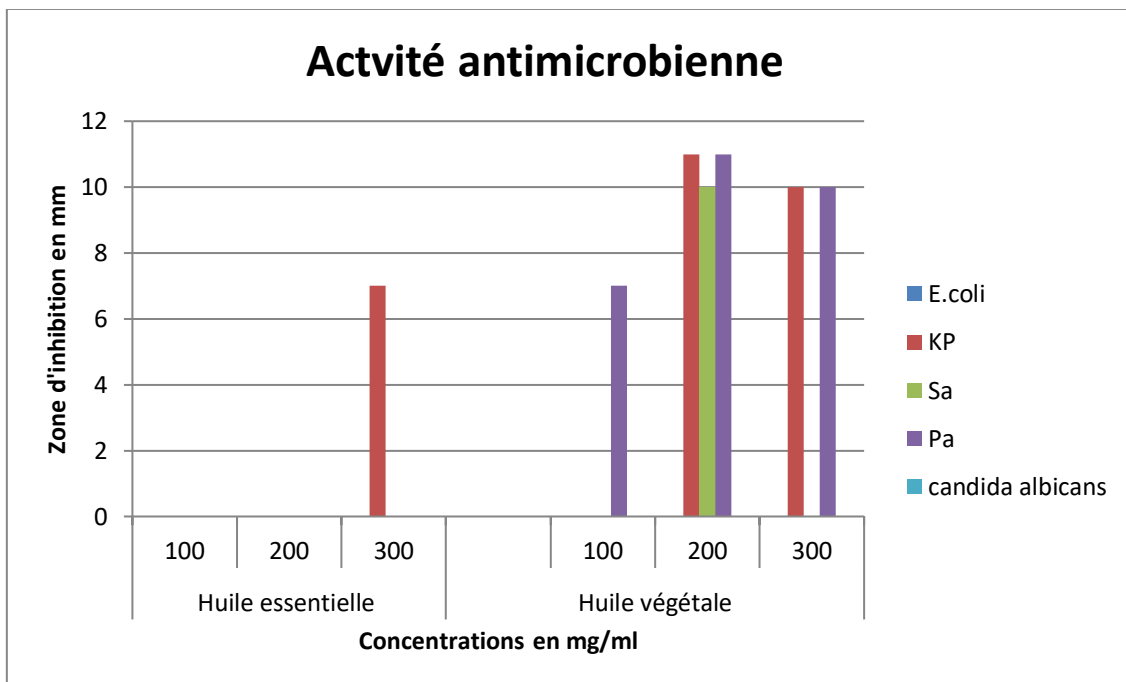
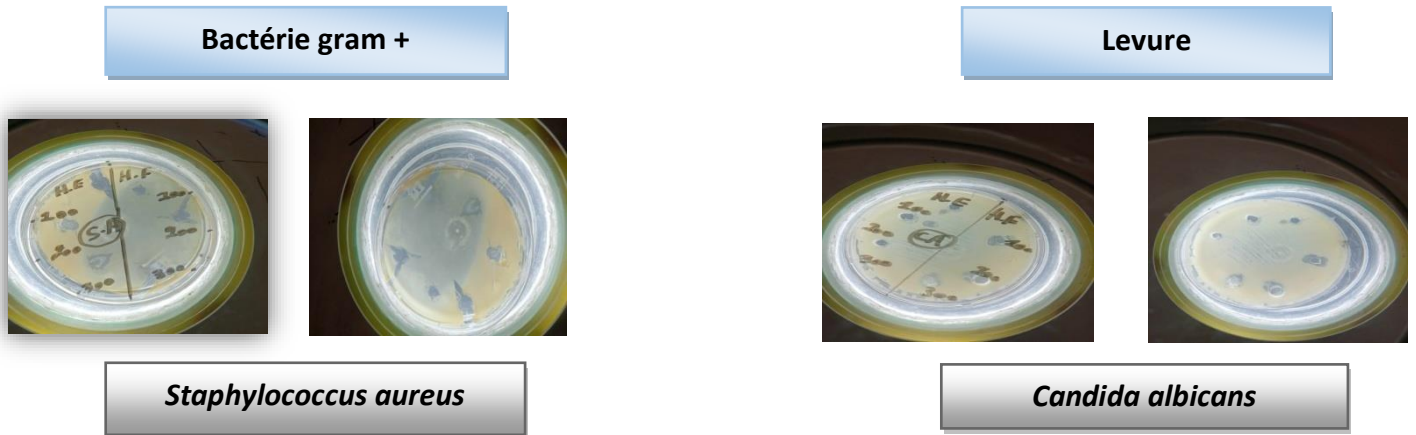


Figure 40 : Représentation graphique de l'activité antibactérienne et l'activité antifongique (*Candida albicans*) de l'huile essentielle et de l'huile végétale de la plante d'*Opuntia ficus indica*.

III.3. Évaluation de l'activité anti-inflammatoire

Pour mettre en évidence l'activité anti-inflammatoire in vitro de l'huile essentielle et huile végétale de la plante d'*Ofi*, deux tests sont réalisés : le test de stabilisation membranaire par la chaleur et le test d'hémolyse. Déclofenac est utilisé comme un anti-inflammatoire de référence. Les résultats sont montrés dans les graphiques suivants :

III.3.1 Test de stabilisation membranaire par chaleur

D'après les données de la figure, le pourcentage d'inhibition d'hémolyse (%) des huiles végétales (de concentration 100 mg/ml) égal à 69% donc plus élevée par rapport aux huiles essentielles 50%. Dans les mêmes conditions l'effet de Diclofenac a montré un effet supérieur par rapport les deux échantillons avec un pourcentage égale 89%. (figure 41).

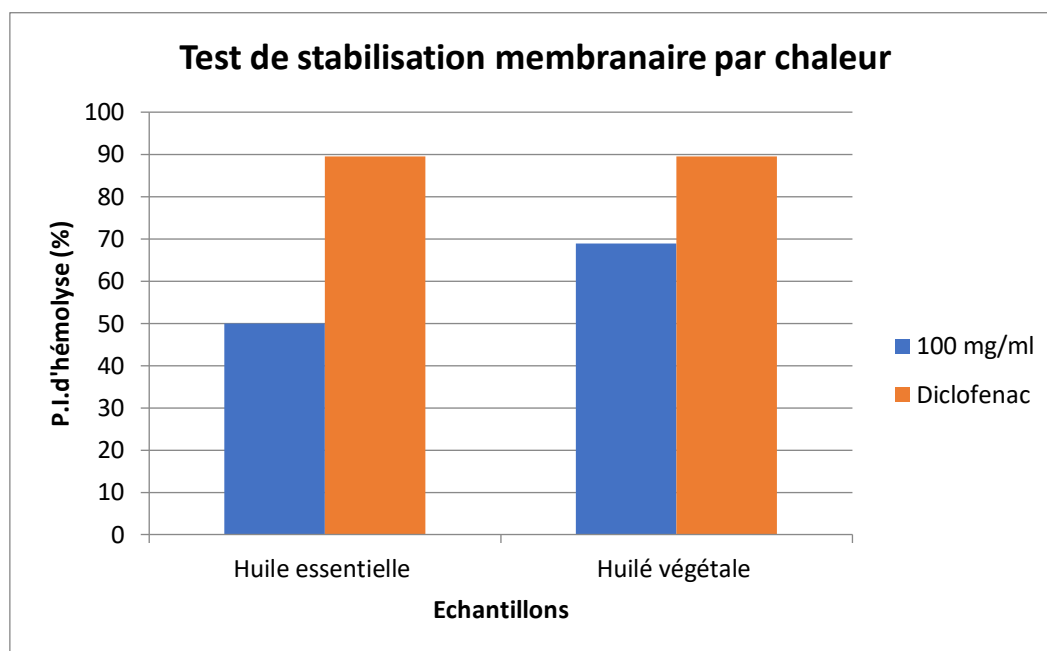


Figure 41 : Résultats de l'effet de l'huile essentielle et huile végétale contre la stabilisation membranaire induite.

III.3.2 Test d'hémolyse

D'après les résultats de cette figure, les huiles essentielles ont montré une activité anti-inflammatoire relativement faible avec un pourcentage d'inhibition de 31 % par rapport un pourcentage égale 41% dans les huiles végétales (de concentration 100 mg/ml).

On a observé que quand la concentration augmente, la vitesse d'hémolyse diminue et la protection des membranes s'intensifie. Dans les mêmes conditions le Diclofenac a montré un effet supérieur par rapport aux deux échantillons testés (HE et HV) avec un pourcentage de 71%.

Selon l'étude de **Koshak et al., (2020)**, l'huile de graines d'*Ofi* cultivée en Arabie Saoudite a été caractérisée par analyse GC-MS et son activité anti-inflammatoire a été évaluée in Vivo à l'aide de modèles chez le rat : l'œdème de la patte causé par la carragénine et l'œdème de l'oreille causé par l'huile de Croton. Les résultats de cette étude montrent que l'huile de graines a entraîné une inhibition significative de l'augmentation des œdèmes induits

par la carragénine et par l'huile de Croton. Cette action est soutenue par une réduction du niveau de prostaglandine E2 ainsi que de l'activité de l'enzyme myéloperoxydase tissulaire. Selon les auteurs, l'effet bénéfique de l'huile serait lié à sa richesse en acides gras insaturés, notamment l'acide oléique (oméga-9) et le β -sitostérol. (figure 42).

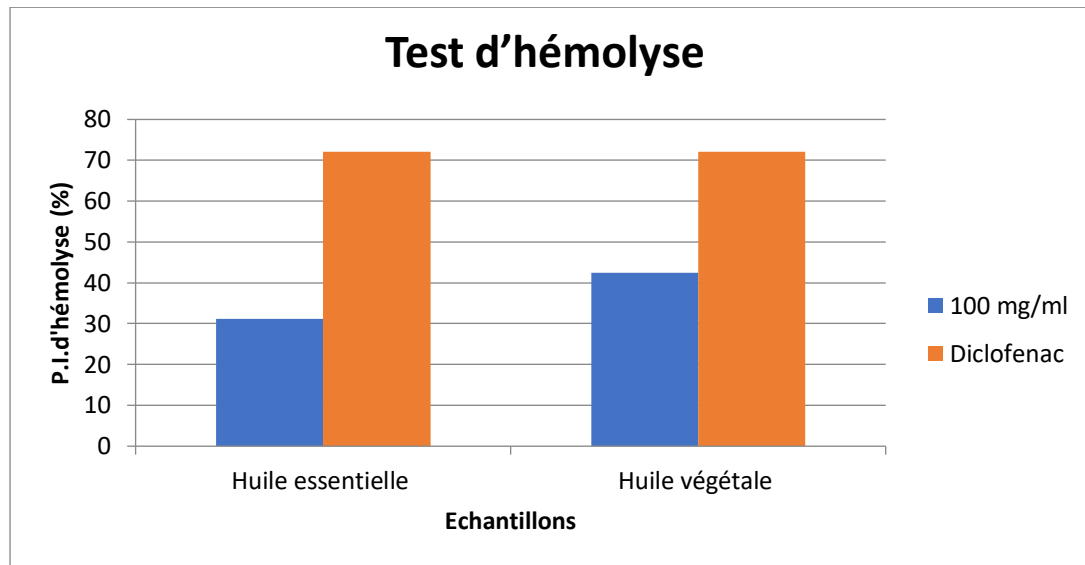


Figure 42 : Résultats de l'effet de l'huile essentielle et huile végétale dans la solution hypotonique



Conclusion

Conclusion

Conclusion

Le Figuier de Barbarie, plante xérophyte appartenant à la famille des *Cactaceae*, peu exigeante, se distingue par sa grande résilience face aux conditions de sécheresse extrême et aux environnements marginaux. Sa richesse en composants bioactifs lui confère une protection efficace contre les aléas climatiques, ce qui explique son utilisation ancienne et reconnue dans la pharmacopée traditionnelle.

Cet arbuste aux multiples vertus est considéré comme une plante miraculeuse : rien ne se perd, tout peut être valorisé.

En effet, toutes ses parties -fruits, graines et cladodes, présentent un potentiel thérapeutique considérable. Pourtant, certaines d'entre elles restent encore largement sous-exploitées, notamment les graines, souvent considérées comme des déchets, ainsi que les cladodes, principalement utilisés comme fourrage.

La recherche scientifique moderne s'intéresse de plus en plus aux composés biologiquement actifs extraits des plantes, perçues comme de véritables usines chimiques. Cette démarche vise à maximiser la valorisation de leurs composants actifs naturels, en tant qu'alternatives aux composés d'origine synthétique.

C'est dans cette perspective que s'inscrit notre étude, qui propose pour la première fois une analyse comparative des activités biologiques, notamment : l'activité antioxydante, antimicrobienne et anti-inflammatoire de l'huile végétale extraite par Soxhlet des graines d'*Opuntia ficus-indica*, et de l'huile essentielle commerciale des cladodes de la même plante.

L'activité antioxydante in vitro des deux huiles a été évaluée par la méthode de piégeage des radicaux 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle (DPPH). Selon nos résultats, il apparaît que l'huile végétale s'est distinguée par une meilleure efficacité anti-radicalaire, avec une IC₅₀ de 2,7736 mg/ml, indiquant une plus grande capacité à neutraliser les radicaux libres, comparativement à l'huile essentielle dont la IC₅₀ est de 4,10 mg/ml.

L'activité antimicrobienne a été déterminée sur cinq souches microbiennes : quatre souches bactériennes (trois Gram négatif et une seule Gram positif) et une souche fongique, selon la méthode de diffusion en puits sur milieu gélosé. Les résultats révèlent que l'huile végétale présente une forte activité, contrairement à l'huile essentielle, qui ne montre qu'une faible activité contre la souche bactérienne *K. pneumoniae*, avec une zone d'inhibition de 7 mm à

Conclusion

une concentration de 300 mg/ml. Ces résultats confirment que l'huile végétale d'*Opuntia ficus indica* présente des propriétés antimicrobiennes très importantes.

Le pouvoir anti-inflammatoire, étudié en utilisant la méthode de stabilisation membranaire des érythrocytes, a révélé des propriétés anti-inflammatoires assez importantes pour les deux huiles, comparables à celles du Diclofénac.

Cette contribution, bien qu'elle ne soit encore qu'une ébauche initiale, vise à préparer le terrain pour des recherches plus approfondies à l'avenir.

Pour compléter cette étude, il serait intéressant d'élargir les perspectives de travail et des'intéresser aux volets suivants :

- ✓ Il serait souhaitable de procéder à l'extraction de l'huile essentielle des cladodes d'*Opuntia ficus indica* plutôt que de l'acheter.
- ✓ Élargir le spectre d'étude en analysant la plante provenant d'autres régions à des fins comparatives.
- ✓ Effectuer une étude des caractéristiques chimiques afin d'identifier les composés présents dans les graines et les cladodes, responsables des activités biologiques.
- ✓ Étendre l'éventail des tests in vitro : antioxydants, antimicrobiens, anti-Inflammatoires et, pourquoi pas, tester d'autres types d'activités.



Références bibliographiques

Références

A

1/ AISSANI, F. (2022). Caractérisation phytochimique, valorisation biologique et toxicologique des différents extraits d'une espèce Algérienne *Sonchus oleraceus* L (Doctoral dissertation).

2/ AKRETCHE, S. (2015). Optimisation des rendements d'extraction de quelques huiles végétales en vue d'améliorer leur qualité par la substitution du n-hexane par le d-limonène (Doctoral dissertation, ENSA).

3/ Al-Naqeb, G., Fiori, L., Ciolli, M., & Aprea, E. (2021). Prickly pear seed oil extraction, chemical characterization and potential health benefits. *Molecules*, 26(16), 5018. <https://doi.org/10.3390/molecules26165018> (Article).

4/ Alqurashi, AS, Al Masoudi, LM, Hamdi, H., & Abu Zaid, A. (2022). Composition chimique et potentiels antioxydant, antiviral, antifongique, antibactérien et anticancéreux de l'huile de graines d'*Opuntia ficus-indica*. *Molecules*, 27 (17), 5453. <https://doi.org/10.3390/molecules27175453> (Article).

5/ Ayari, D. (2021). Etude des effets toxiques des huiles végétales oxydées sur la physiologie et le métabolisme cellulaire des lapins (Doctoral dissertation).

6/ Arba, M. (2009, May). Le cactus *Opuntia*, une espèce fruitière et fourragère pour une agriculture durable au Maroc. In Actes du Symposium International AGDUMED-durabilité des systèmes de culture en zone méditerranéenne et gestion des ressources en eau et en sol (pp. 14-16). (Article).

7/ Angane, M., Swift, S., Huang, K., Butts, CA, et Quek, SY (2022). Huiles essentielles et leurs principaux composants : une revue actualisée des activités antimicrobiennes, de leur mécanisme d'action et de leur application potentielle dans l'industrie alimentaire. *Foods*, 11 (3), 464. <https://doi.org/10.3390/foods11030464>. (Article).

8/ antimicrobial and wound healing potential of *Opuntia ficus indica* L. inermis extracted. *Hindawi Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*

Volume 2019, Article ID 9148782, 10 pages <https://doi.org/10.1155/2019/9148782> (article).

Référence

9/ Arab J Sci Eng 45, 4571–4578 (2020). Koshak, A. E., Abdallah, H. M., Esmat, A., & Rateb, M. E. (2020). Anti-inflammatory activity and chemical characterisation of *Opuntia ficus-indica* seed oil cultivated in Saudi Arabia. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45, 4571-4578. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04555-x>.

(RESEARCH ARTICLE-BIOLOGICAL SCIENCES).

10/Applications of essential oils and plant extracts in different industries. *Molecules*.(2022). Bolouri, P., Salami, R., Kouhi, S., Kordi, M., Asgari Lajayer, B., Hadian, J., & Astatkie, T. (2022). Applications of Essential Oils and Plant Extracts in Different Industries. *Molecules*, 27(24), 8999. <https://doi.org/10.3390/molecules27248999>
(Review Article).

B

11/Badreddine, MOUSSAOUI. (2020). Les Propriétés Biologiques d'Extraits des Cladodes d'*Opuntia ficus indica* (L.). **(Doctoral dissertation).**

12/ Bardaa, S., Turki, M., Ben Khedir, S., Mzid, M., Rebai, T., Ayadi, F., & Sahnoun, Z. (2020). The effect of prickly pear, pumpkin, and linseed oils on biological mediators of acute inflammation and oxidative stress markers. *BioMed research international*, 2020(1), 5643465. Bardaa S, Turki M, Ben Khedir S, Mzid M, Rebai T, Ayadi F, Sahnoun Z. The Effect of Prickly Pear, Pumpkin, and Linseed Oils on Biological Mediators of Acute Inflammation and Oxidative Stress Markers. *Biomed Res Int*. 2020 Aug 2;2020:5643465. [doi:10.1155/2020/5643465](https://doi.org/10.1155/2020/5643465). PMID:32802857;PMCID: PMC7421017.

13/ BENATTIA, F. K. (2017). Analyse et applications des extraits de pépins de figes de barbarie (Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid). **(Doctoral dissertation).**

14/ Benslimane, A. (2020). Les huiles fixes : usages thérapeutiques et cosmétiques ; production et commercialisation. **(Doctoral dissertation).**

15/ Boungou-Tsona, G. (2023). Études phytochimiques et activités anti-inflammatoires d'extraits de plantes médicinales du Congo Brazzaville (Université Clermont Auvergne ; Université Marien-Ngouabi (Brazzaville)). **(Doctoral dissertation).**

Référence

- 16/ Boutakiout, A. (2015). Etude physico-chimique, biochimique et stabilité d'un nouveau produit : jus de cladode du figuier de Barbarie marocain (OPUNTIA ficus-indica et OPUNTIA megacantha) (Université d'Angers). (**Doctoral dissertation**).
- 17/ Brahmi, F., Haddad, S., Bouamara, K., Yalaoui-Guellal, D., Prost-Camus, E., De Barros, J. P. P., ... & Lizard, G. (2020). Comparison of chemical composition and biological activities of Algerian seed oils of Pistacia lentiscus L., Opuntia ficus indica (L.) mill. and Argania spinosa L. Skeels. *Industrial Crops and Products*, 151, 112456. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112456>. (article).
- 18/ Boukhatem, M. N., Ferhat, A., & Kameli, A. (2019). Méthodes d'extraction et de distillation des huiles essentielles : revue de littérature. *Une*, 3(4), 1653-1659. <http://agrobiologia.net/online/wp-content/uploads/2020/01/18-1653-1659-BOUKHATEM-et-al.pdf>.
- 19/BENCHEIKH, S. E. (2017). Etude de l'activité des huiles essentielles de la plante *Teucrium polium* ssp *Aurasianum* Labiatae (**Doctoral dissertation**).
- 20/Ben Miri, Y. (2025). Essential Oils: Chemical Composition and Diverse Biological Activities: A Comprehensive Review. *Natural Product Communications*, 20(1), 1934578X241311790. <https://doi.org/10.1177/1934578X241311790>.
- 21/ Bounab, S. (2020). Biodiversité végétale de la région du Hodna (M'sila) : étude phytochimique et activité biologique de quelques espèces médicinales (**Doctoral dissertation**).
- 22/ Bouhaddouda, N. (2016). Activités antioxydante et antimicrobienne de deux plantes du sol local : *Origanum vulgare* et *Mentha pulegium*., Univ Badji Mokhtar, Annaba. (**Doctoral dissertation**).
- 23/ Bolouri, P., Salami, R., Kouhi, S., Kordi, M., Asgari Lajayer, B., Hadian, J., & Astatkie, T. (2022). Applications of Essential Oils and Plant Extracts in Different Industries. *Molecules*, 27(24), 8999. <https://doi.org/10.3390/molecules27248999>.
- 24/ Bhat, R. A., Hakeem, K. R., & Dervash, M. A. (Eds.). (2021). *Phytomedicine : a treasure of pharmacologically active products from plants*. Academic Press, (Book).

Référence

25/ Boutaghane, N., Kabouche, Z., & Voutquenne, L. (2013). Etude phytochimique et pharmacologique de plantes médicinales Algériennes *Genista ulicina* Spach (Fabaceae) et *Chrysanthemum macrocarpum* (Sch. Bip.) Coss. & Kralik ex Batt (Asteraceae) ([Doctoral dissertation](#)).

26/ Bouaouich, A., Bouguerche, F., Mahiaoui, H., Peron, G., & Bendif, H. (2023). Phytochemical elucidation and antioxidant activity of seeds from three prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L.) cultivars from Algeria. *Applied Sciences*, 13(3), 1444
<https://doi.org/10.3390/app13031444>.

27/ Bouzid, D. (2018). Évaluation de l'activité biologique de l'huile essentielle d'une plante endémique *Hélichrysum italicum* (Roth) G. DON ([Doctoral dissertation](#)).

28/ Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. L. W. T. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food science and Technology*, 28(1), 25-30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5).

29/ Biar, A. (2020). A lacustrine cultural landscape in the prehispanic Basin of Mexico. *International Journal of Nautical Archaeology*, 49(2), 341-35.
<http://dx.doi.org/10.1111/1095-9270.12424>.

30/ Bouhrim, M., Ouassou, H., Boutahiri, S., Daoudi, N. E., Mechchate, H., Gressier, B., Eto, B., Imtara, H., A. Alotaibi, A., Al-zharani, M., Ziyat, A., Mekhfi, H., Legssyer, A., Aziz, M., & Bnouham, M. (2021). *Opuntia dillenii* (Ker Gawl.) Haw., Seeds Oil Antidiabetic Potential Using In Vivo, In Vitro, In Situ, and Ex Vivo Approaches to Reveal Its Underlying Mechanism of Action. *Molecules*, 26(6), 1677.
<https://doi.org/10.3390/molecules26061677>.

C

31/ Caminiti, R., Serra, M., Nucera, S., Ruga, S., Oppedisano, F., Scarano, F., ...& Maiuolo, J. (2024). Antioxidant Activity and Seasonal Variations in the Composition of Insoluble Fiber from the Cladodes of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller : Development of New Extraction Procedures to Improve Fiber Yield. *Plants*, 13(4), 544.
<https://doi.org/10.3390/plants13040544>

Référence

32/ Chakir, E. G. (2022). Contribution à la valorisation pharmacologique et chimique du figuier de barbarie et de ses dérivés : modélisation et optimisation par la méthodologie de surface de réponse. (Doctoral dissertation).

33/ CHEKOUAL, L. Etude du pouvoir antimicrobien et antioxydant d'huiles essentielles de Lavandula stoechas du nord d'Algérie extraites par hydrodistillation et ultrasons (Doctoral dissertation, Université Blida1-Saad Dahlab)..

D

34/ Deng, Y. (2023). Extraction liquide-liquide en milieu supercritique et dés extraction associée (Doctoral dissertation, Université Paris-Saclay).

35/ DERBAK, L. (2024). Contribution à la valorisation phytochimique, activités antimicrobienne, antioxydante et autres effets biologiques des extraits bioactifs de quelques plantes médicinales. (Doctoral dissertation).

36/ Do, T. K. T. (2016). Évaluation des performances de la chromatographie sur couche mince haute performance (HPTLC) dans l'analyse (qualitative et quantitative) des métabolites secondaires dans les extraits naturels (Doctoral dissertation, COMUE Université Côte d'Azur (2015-2019)).

37/ Dr Manisha, Dr. Ram Babu, Dr. A. Maajitha Begam, Dr Kavita Shakya Chahal, Mr. Akshay Ashok Harale,(2025) Medicinal Plants and Traditional Uses and Modern Applications. Journal of Neonatal Surgery, 14 (3), 162-175.

<https://doi.org/10.52783/jns.v14.2210>.

E

38/El Kharrassi, Y. (2015). Mise en évidence de la diversité des populations de cactus (Opuntia spp.) au Maroc et de la modulation du métabolisme lipidique par des extraits naturels et de phytostérols issues de cactus ou d'huile d'Argan dans les cellules microgliales BV2 (Doctoral dissertation, Université de Bourgogne).

Référence

39/ El-Mostafa, K., El Kharrassi, Y., Badreddine, A., Andreoletti, P., Vamecq, J., El Kebbjaj, M. H. S., ...& Cherkaoui-Malki, M. (2014). Nopal cactus (*Opuntia ficus- indica*) as a source of bioactive compounds for nutrition, health and disease *Molecules*, 19(9), 14879-14901 <https://doi.org/10.3390/molecules190914879>.

40/ Elouazkiti, M., Zefzoufi, M., Elyacoubi, H., Gadhi, C., Bouamama, H., & Rochdi, A. (2024). Phytochemical Analysis and Bioactive Properties of *Opuntia dillenii* Flower Extracts, Compound, and Essential Oil. *International Journal of Food Science*, 2024(1), 6131664 <https://doi.org/10.1155/2024/6131664>.

F

41/ Ferdjioui, S. (2020). Activités biologiques de deux plantes médicinales *Mentharotundifolia*L. Et *Lamium amplexicaule*L (Doctoral dissertation).

G

42/ Gagnon, Y. (2021). Étude de l'extraction des huiles végétales en milieu aqueux assistée par des tensioactifs (Doctoral dissertation, Université de Technologie de Compiègne).

43/ GHANEMI, F. Z., Abdelhafid, N. A. N. I., PATOLI, D., KHALDI, D., Zoubida, M. A. M. I., & BELARBI, M. (2022). Evaluation of the nutritional value and antioxidant activity of *Opuntia ficus indica* seeds in the western region of Algeria. *Journal of Natural Product Research and Applications*, 2(1), 54-66. DOI: [10.46325/jnpra.v2i1.41](https://doi.org/10.46325/jnpra.v2i1.41) (Research Article).

44/Gulcin,İ.,&Alwasel,S.H.(2023). DPPH radical scavenging assay. *Processes*,11(8), 2248. <https://doi.org/10.3390/pr11082248>.

45/ K. Ghédira, P. Goetz. Figuier de barbarie : *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae). *Phytothérapie*. 2018;16(6):374-378. [doi:10.3166/phyto-2018-0091](https://doi.org/10.3166/phyto-2018-0091).

46/GOUDJIL, M. B. (2016). Composition chimique, activité antimicrobienne et antioxydante de trois plantes aromatiques (Doctoral dissertation).

Référence

H

47/ Habibi, Y. (2004). Contribution à l'étude morphologique, ultra structurale et chimique de la figue de barbarie. Les polysaccharides pariétaux : caractérisation et modification chimique (**Doctoral dissertation**, Université Joseph-Fourier-Grenoble I).

48/ Hicham, BERRABAH (2019). Caractérisation morphologique, phytochimique et moléculaire pour la valorisation de quelques populations du figuier de barbarie (*Opuntia ficus-indica* L.) en Algérie (**Doctoral dissertation**, Université Ibn Khaldoun-Tiaret-).

I

49/ Ilham, S. (2023). Valorisation des ressources biologiques en lutte contre les déprédateurs et les Maladies des céréales : cas des extraits de plantes autochtones (**Doctoral dissertation**).

K

50/ Karabagias, V. K., Karabagias, I. K., Gatzias, I., & Badeka, A. V. (2020). Prickly pear seed oil by shelf-grown cactus fruits : waste or maste ?. *Processes*, 8(2), 132. <https://doi.org/10.3390/pr8020132>.

51/ KELLER, A. L., GIRARD, C., & CHAUMONT, J. P. (2009). *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill, le figuier de barbarie ou nopal, une plante aux multiples usages. *La Phytothérapie européenne*, (51), 24-27.

52/ Khémiri, I., & Bitri, L. (2019). Effectiveness of *Opuntia ficus indica* L. inermis seed oil in the protection and the healing of experimentally induced gastric mucosa ulcer. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2019(1), 1568720.

[doi: 10.1155/2019/1568720](https://doi.org/10.1155/2019/1568720). PMID: 31827668; PMCID: PMC6881774.

53/ Khémiri, I., Essghaier Hédi, B., Sadfi Zouaoui, N., Ben Gdara, N., & Bitri, L. (2019). The antimicrobial and wound healing potential of *Opuntia ficus indica* L. inermis extracted oil from Tunisia. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2019(1), 9148782. <https://doi.org/10.1155/2019/9148782>.

Référence

- 54/ Kherbache, A. (2023). Activités anti-inflammatoires et antioxydantes d'extraits de *Helichrysum stoechas* (L.) Moench ([Doctoral dissertation](#)).
- 55/ Kiralan, M., Ketenoglu, O., Kiralan, S. S., & Özkan, G. (2021). *Opuntia* spp. Essential oils. *Opuntia* spp. : Chemistry, Bioactivity and Industrial Applications, 355-367. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-78444-7_16
- 56/ Koshak, A. E., Abdallah, H. M., Esmat, A., & Rateb, M. E. (2020). Anti-inflammatory activity and chemical characterisation of *Opuntia ficus-indica* seed oil cultivated in Saudi Arabia. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45, 4571-4578. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04555-x>

L

- 57/ Lallouche, B. (2018). Etudes des marqueurs morphologiques, biochimiques et moléculaires des génotypes d'*Opuntia*, en relation avec le développement dans des conditions de stress salin. ([Doctoral dissertation](#)).
- 58/ Lavenburg, V. M., Rosentrater, K. A., & Jung, S. (2021). Extraction methods of oils and phytochemicals from seeds and their environmental and economic impacts. *Processes*, 9(10), 1839. <https://doi.org/10.3390/pr9101839>.
- 59/ Louaer, M., & Zermane, A. (2019). Etude de l'extraction des huiles végétales des noyaux de dattes et graines de sésame par CO₂ supercritique ([Doctoral dissertation](#), Université Constantine 3 Salah Boubnider, Faculté de génie des procédés pharmaceutiques).

M

- 60/ Martemucci, G., Costagliola, C., Mariano, M., D'andrea, L., Napolitano, P., & D'Alessandro, A. G. (2022). Free radical properties, source and targets, antioxidant consumption and health. *Oxygen*, 2(2), 48-78. <https://doi.org/10.3390/oxygen2020006>.

Référence

- 61/ Martins, M., Ribeiro, M. H., & Almeida, C. M. (2023). Physicochemical, nutritional, and medicinal properties of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. And its main agro- industrial use : A review. *Plants*, 12(7), 1512. <https://doi.org/10.3390/plants12071512>.
- 62/ Martins, R., Barbosa, A., Advinha, B., Sales, H., Pontes, R., & Nunes, J. (2023). Green extraction techniques of bioactive compounds : a state-of-the-art review. *Processes*, 11(8), 2255. <https://doi.org/10.3390/pr11082255>.
- 63/Mayouf, N. (2019). Propriétés antioxydante anti-inflammatoire et immunomodulatrice des extraits d'*Asphodelus microcarpus* (Doctoral dissertation).
- 64/ Monteiro, S. S., Almeida, R. L., Santos, N. C., Pereira, E. M., Silva, A. P., Oliveira, H. M. L., & Pasquali, M. A. D. B. (2023). New functional foods with cactus components : Sustainable perspectives and future trends. *Foods*, 12(13), 2494. <https://doi.org/10.3390/foods12132494>.
- 65/ MOUFFOUK, C. (2019). Evaluation des activités biologiques et étude de la composition chimique de la plante *Scabiosa stellata* L (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- 66/ Msaddak, L. (2018). Propriétés techno-fonctionnelles et substances bioactives de deux ingrédients alimentaires : cladodes du figuier de barbarie et feuilles de vigne (Doctoral dissertation, Thèse de Doctorat, Université de Gabès Tunis. P56).
- 67/ Mulas, M., & Mulas, G. (2004). Potentialités d'utilisation stratégique des plantes des genres *Atriplex* et *Opuntia* dans la lutte contre la désertification. Short and Medium-Term Priority Environmental Action Programme (SMAP). Université des études de SASSAR, P. 56-57. (Book).
- 68/ Alexandra Martins. Les huiles essentielles antibactériennes : exemple du thym (thymus). Sciences pharmaceutiques. 2020. dumas-03230057(Doctoral dissertation).
- 69/ Mohamadi, Y. (2023). Etude phytochimique et activités biologiques des huiles essentielles des populations du genre *Myrtus* L. en Algérie (Doctoral dissertation).
- 70/ Mnayer, D. (2014). Eco-Extraction des huiles essentielles et des arômes alimentaires en vue d'une application comme agents antioxydants et antimicrobiens (Doctoral dissertation, Université d'Avignon).

Référence

- 71/ Matera, R., Lucchi, E., & Valgimigli, L. (2023). Plant essential oils as healthy functional ingredients of nutraceuticals and diet supplements : a review. *Molecules*, 28(2), 901. [DOI: 10.3390/molecules28020901](https://doi.org/10.3390/molecules28020901). PMID: 36677959; PMCID: PMC9862182.
- 72/ Miguel MG. Antioxidant and anti-inflammatory activities of essential oils: a short review. *Molecules*. 2010 Dec 15;15(12):9252-87. [doi: 10.3390/molecules15129252](https://doi.org/10.3390/molecules15129252). PMID: 21160452; PMCID: PMC6259136.
- 73/ Maiuolo J, Nucera S, Serra M, Caminiti R, Oppedisano F, Macrì R, Scarano F, Ragusa S, Muscoli C, Palma E, Mollace V. Cladodes of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. Possess Important Beneficial Properties Dependent on Their Different Stages of Maturity. *Plants (Basel)*. 2024 May 14;13(10):1365. [doi: 10.3390/plants13101365](https://doi.org/10.3390/plants13101365). PMID: 38794436; PMCID: PMC11124804.
- 74/ Marie-Elisabeth Lucchesi. Extraction Sans Solvant Assistée par Micro-ondes Conception et Application à l'extraction des huiles essentielles. Autre. Université de la Réunion, 2005. Français. NNT : tel-00118895. (Doctoral dissertation).
- 75/ Moosazadeh, E. and Akhgar, M. R. and Kariminik, A., 2014, 3295464, English, Journal article, Bangladesh, 2222-3045 2220-6663, 4, (5), Dhaka, Journal of Biodiversity and Environmental Sciences (JBES), (94–101), Shamokal Publications, Chemical composition and antimicrobial activity of *Opuntia stricta* F. essential oil., (2014). [\(RESEARCH PAPER\)](#).
- 76/ Manisha, D. R. B., Begam, A. M., Chahal, K. S., & Ashok, M. A. (2025). Medicinal Plants and Traditional Uses and Modern Applications. *Journal of Neonatal Surgery*, 14(3). <https://doi.org/10.52783/jns.v14.2210>.

N

- 77/ Nde, D. B., & Foncha, A. C. (2020). Optimization methods for the extraction of vegetable oils : A review. *Processes*, 8(2), 209. <https://doi.org/10.3390/pr8020209>

Référence

78/ Neffar, S. (2012). Etude de l'effet de l'âge des plantations de figuier de Barbarie (*Opuntia ficus indica* L. Miller) sur la variation des ressources naturelles (sol et végétation) des steppes algériennes de l'Est. Cas de Souk-ahras et Tébessa (**Doctoral dissertation**, Annaba).

79/ Nejia Herzi. Extraction et purification de substances naturelles : comparaison de l'extraction au CO₂-supercritique et des techniques conventionnelles. Autre. Institut National Polytechnique de Toulouse – INPT ; École nationale d'ingénieurs de Gabès (Tunisie), 2013. Français. ⟨NNT : 2013INPT0022⟩. ⟨tel-04237879⟩ (**Doctoral dissertation**).

80/ Nosek M, Gawrońska K, Rozpądek P, Szechyńska-Hebda M, Kornaś A, Miszański Z. Withdrawal from functional Crassulacean acid metabolism (CAM) is accompanied by changes in both gene expression and activity of antioxidative enzymes. *J Plant Physiol.* 2018 Oct; 229:151-157. [doi:10.1016/j.jplph.2018.07.011](https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.07.011). Epub 2018 Aug 1. PMID: 30092447.

81/ Nebie, B. (2023). Composition chimique et activités biologiques d'huiles essentielles obtenues par co-distillation de quelques plantes aromatiques du Burkina Faso (**Doctoral dissertation**, Université Nazi Boni).

O

82/ Odoux, E., & Domínguez López, A. (1996). Le figuier de Barbarie : une source industrielle de bétalaïnes ?.

P

83/P. FOURNIER. LES CACTÉES ET LES PLANTES GRASSES. PAUL LECHEVALIER ÉDITEUR 12, RUE DE Tournon, 12 PARIS-Vie (France), (1954). LA VIE DES CACTÉES, page, VII. (**Livre**).

Référence

84/ Pereira RB, Rahali FZ, Nehme R, Falleh H, Jemaa MB, Sellami IH, Ksouri R, Bouhallab S, Cecilian F, Abdennebi-Najar L, Pereira DM. Anti-inflammatory activity of essential oils from Tunisian aromatic and medicinal plants and their major constituents in THP-1 macrophages. *Food Res Int.* 2023 May;167:112678. [doi: 10.1016/j.foodres.2023.112678](https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112678). Epub 2023 Mar 15. PMID: 37087210.

85/ Phytochemistry and biological activities of Opuntia seed oils: Opuntia dillenii.(2021), International journal edited by the Institute of Natural Fibres and Medicinal Plants National Research Institute, Vol. 67 No. 2 2021, [DOI: 10.2478/hepo-2021-0008](https://doi.org/10.2478/hepo-2021-0008) (REVIEW PAPER).

R

86/ Ramírez-Moreno, E., Cariño-Cortés, R., Cruz-Cansino, N. D. S., Delgado-Olivares, L., Ariza-Ortega, J. A., Montañez-Izquierdo, V. Y., ... & Filardo-Kerstupp, T. (2017). Antioxidant and antimicrobial properties of cactus pear (Opuntia) seed oils. *Journal of Food Quality*, 2017(1), 3075907. <http://dx.doi.org/10.1155/2017/3075907>.

S

87/ Sadia, MANSOUR. (2015). Evaluation de l'effet anti inflammatoire de trois plantes médicinales (Doctoral dissertation, Université mohamed boudiaf des sciences et de la technologie d'oran).

88/Sáenz Hernández, C. L., Berger, H., Rodríguez-Félix, A., Galletti, L., Corrales García, J., Sepúlveda, E., ... & Rosell, C. Agro-industrial utilization of cactus pear. Rural Infrastructure and Agro-Industries Division. Rome, Italy, 2013. Chapter 1 Opuntias as a natural resource, Page 1-3. (Book).

89/ Schweizer Marc. Docteur Nopal, Le médecin du bon dieu. Edition APB (Aloe Plantes et Beauté). Paris (France), (1997). PETITE HISTOIRE DU NOPAL, Page 19, 23, 24 , 27, 32 et 40. (Book).

90/ Shoukat, R., Cappai, M., Pia, G. et Pilia, L. (2023). Une revue mise à jour : la chimie de l'Opuntia ficus indica (OFI) et ses diverses applications. *Sciences appliquées* , 13 (13), 7724. <https://doi.org/10.3390/app13137724>.

Référence

91/ Shobana, S., & Vidhya, R. (2016). Evaluation of in vitro hemolytic activity of different parts of *Abutilon indicum* (Linn.). *World J Pharm Pharm Sci*, 5(5), 1182-96.

92/ Shinde, U. A., Phadke, A. S., Nair, A. M., Mungantiwar, A. A., Dikshit, V. J., & Saraf, M. N. (1999). Membrane stabilizing activity—a possible mechanism of action for the anti-inflammatory activity of *Cedrus deodara* wood oil. *Fitoterapia*, 70(3), 251-257. [https://doi.org/10.1016/S0367-326X\(99\)00030-1](https://doi.org/10.1016/S0367-326X(99)00030-1).

T

93/ Timothée Cherièr et Abderrahmane Ait. *ÉCOLOGIE CULTURE ET UTILISATIONS DU FIGUIER DE BARBARIE*. L'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture Et le Centre International pour la Recherche Agricole dans les Zones Arides Rome, 2018. Chapitre 03 Morphologie et anatomie de *platyopuntia*, P22- 23-29. (Book).

V

94/ Vona R, Pallotta L, Cappelletti M, Severi C, Matarrese P. The Impact of Oxidative Stress in Human Pathology: Focus on Gastrointestinal Disorders. *Antioxidants* (Basel). 2021 Jan 30;10(2):201. [doi:10.3390/antiox10020201](https://doi.org/10.3390/antiox10020201). PMID: 33573222; PMCID: PMC7910878.

95/ Vora LK, Gholap AD, Hatvate NT, Naren P, Khan S, Chavda VP, Balar PC, Gandhi J, Khatri DK. Essential oils for clinical aromatherapy: A comprehensive review. *J Ethnopharmacol*. 2024 Aug 10;330:118180. [doi: 10.1016/j.jep.2024.118180](https://doi.org/10.1016/j.jep.2024.118180). Epub 2024 Apr 16. PMID: 38614262.

Y

96/ Yu J. Chemical Composition of Essential Oils and Their Potential Applications in Postharvest Storage of Cereal Grains. *Molecules*. 2025 Feb 4;30(3):683. [doi: 10.3390/molecules30030683](https://doi.org/10.3390/molecules30030683). PMID: 39942787; PMCID: PMC11820458.

Référence

Z

97/ Zakkad, F. (2017). Etude phytochimique et évaluation de quelques propriétés biologiques de trois espèces de l'Euphorbia. Université Badji Mokhtar-Annaba. (Doctoral dissertation).

98/ Zeghib W, Boudjouan F, Vasconcelos V, Lopes G. Phenolic Compounds' Occurrence in Opuntia Species and Their Role in the Inflammatory Process: A Review. *Molecules*. 2022 Jul 25;27(15):4763. doi: [10.3390/molecules27154763](https://doi.org/10.3390/molecules27154763). PMID: 35897933; PMCID: PMC9330797.

99/ Zakariae, B. (2018). Extraction, caractérisation et potentiel inhibiteur des huiles essentielles contre la corrosion d'aciers doux dans une solution chlorhydrique molaire. (Doctoral dissertation).



Annexes

Annexes

Annexes

Préparation du milieu de culture

Pour tester l'activité antimicrobienne, nous avons utilisé :

➤ **Milieu de culture solide:**

Gélose Mueller-Hinton(MH) : 38g de MH déshydraté ont été versés dans 1 litre d'eau distillée, puis la solution a été placée dans un agitateur chauffant pour assurer une répartition uniforme. Le milieu a été stérilisé à l'autoclave à 120 °C pendant 20minutes.

➤ **Milieu de culture liquide :**

Bouillon Mueller-Hinton (BMH) : dans une solution d'un litre d'eau distillée, trois produits différents ont été ajoutés : 1,5 g d'amidon, 17,5 g de caséine hydrolysée et 2 g d'extrait de viande de bœuf. Le mélange a ensuite été homogénéisé à l'aide d'un agitateur puis autoclavé (figure 43).

Annexes

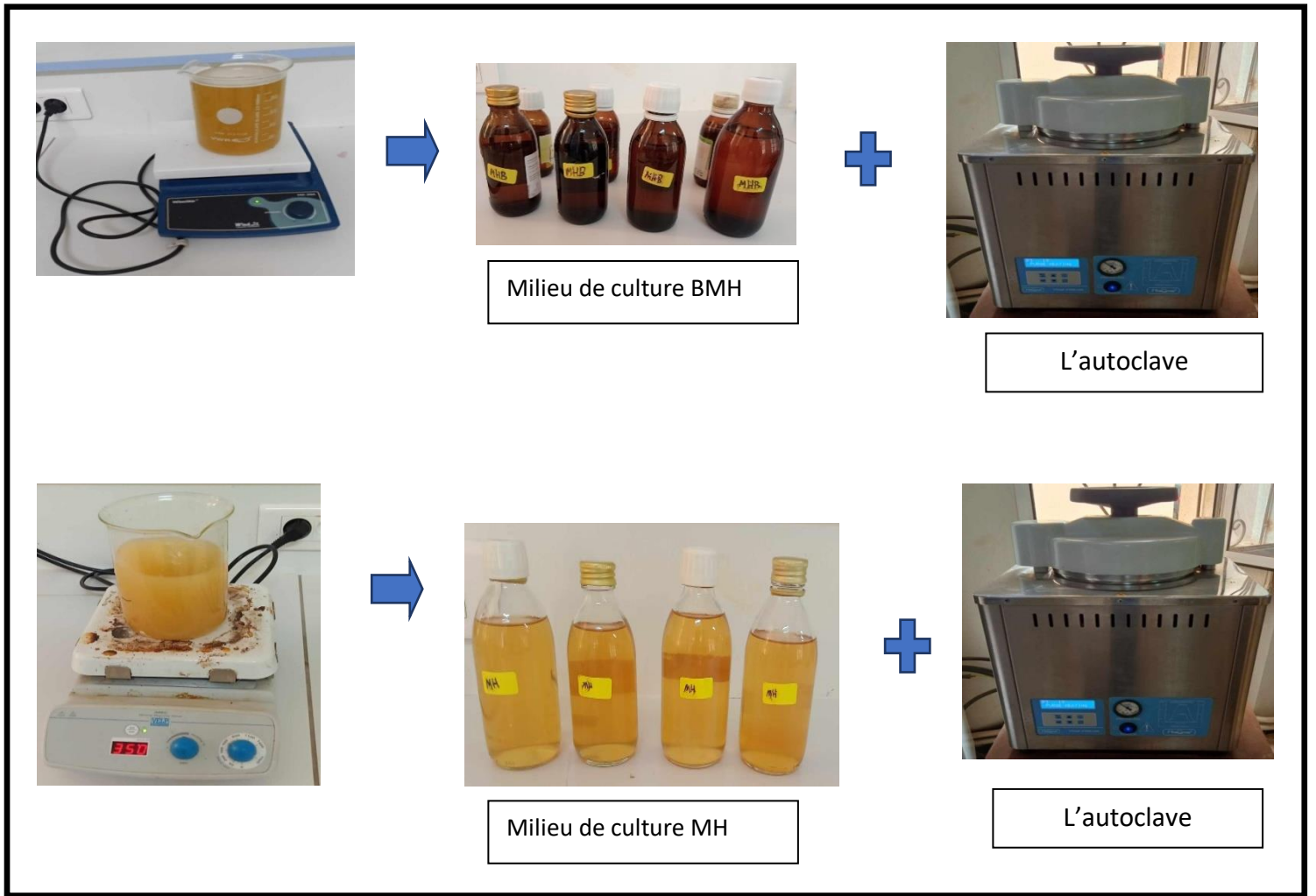


Figure 43 : préparation des milieux de culture MH et BMH.