

Université de RELIZANE
Faculté des Sciences de la Nature et de la vie
Département des Sciences Biologiques



MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en :

Biochimie appliquée

Intitulé

Etude des activités antioxydante et antiinflammatoire de l'huile essentielle
de la plante aromatique *Artemisia herba-alba* de la région de Relizane
(Algérie).

Présenté par :

Mr : BOUDEFIR Ibrahim

Mr : BRAHMI Abed El djalil

Mr : ZERARI Youssouf

Devant les membres de jury :

Président : Mr BRAHIMI Mostapha

Maître de conférence (B) (U. Relizane)

Encadreur : Mr MALTI Charafeddine W.

Maître de conférence (B) (U. Relizane)

Examineur : Mme KEBAL Leila

Maître assistant (B) (U. Relizane)

DEDICACES

Avant toute chose, je remercie "الله", le Tout-Puissant, de m'avoir accordé la santé, la patience et le courage nécessaires pour accomplir ce travail.

Je dédie ce modeste travail :

- À toutes les personnes qui m'ont encouragé(e) dans les moments difficiles.*
- À la lumière de mes yeux, l'ombre de mes pas et le bonheur de ma vie : ma mère, qui m'a apporté son soutien tout au long de mes années d'études, pour ses sacrifices et son soutien qui m'ont donné confiance, courage et sécurité.*
- À mon cher père, Aoude, qui m'a appris le sens de la persévérance durant mes études, pour ses sacrifices, ses conseils et ses encouragements.*
- À mon frère Oussama et à ma sœur.*
- À toute ma famille.*
- À mon encadreur, le Dr. Malti, pour ses conseils, sa présence et sa patience.*
- À mes binômes Youssouf et Abdel Djalil.*
- Enfin, à tous ceux qui m'aiment.*

Ibrahim

DEDICACES

Louange à Dieu, grâce à qui les bonnes actions s'accomplissent, et par sa réussite les efforts sont couronnés.

- À Lui seul reviennent louange et gratitude, au début comme à la fin, pour l'aide et la guidance qui ont marqué ce parcours scientifique, ainsi que pour l'inspiration et la patience qui ont conduit nos pas vers cette grande réussite.

- Reconnaissant la grandeur de la faveur divine, nous ne pouvons que témoigner notre profonde gratitude à ma chère mère et à mon cher père, qui ont été une source inépuisable de générosité et un soutien solide. Leur appui illimité est le secret de mon succès et de mon excellence.

- Je tiens également à exprimer mes sincères remerciements à mes professeurs honorables, qui ont été des phares de savoir et de bons exemples, et à chaque âme bienveillante qui a laissé une empreinte positive dans notre parcours.

- Ce travail, fruit d'années de dévouement et d'efforts, n'aurait pu voir le jour sans la grâce de Dieu, puis sans ces mains généreuses.

Abd Eljalil

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail :

Aux personnes les plus chères au monde : mon père et ma mère, pour leur amour inconditionnel, leur soutien et leurs innombrables sacrifices.

À mon frère et à mes sœurs, qui ont toujours cru en moi et m'ont encouragée tout au long de ce parcours.

À mes neveux et nièces : Moustapha, Malek, Abdelrezzak, Deif-Allah, Hayet, Ghizlane, Yahia, Ibrahim, Soundous, Kouater, Rafif et Sahar.

À mon superviseur, le Dr Malti, pour son dévouement exemplaire, ses conseils avisés, son humilité, sa générosité et ses encouragements constants.

À mes amis fidèles, pour leur présence et leurs encouragements constants, et tout particulièrement à mon ami Karim, pour son soutien indéfectible et sa précieuse amitié.

Merci du fond du cœur.

Yousseuf

REMERCIEMENTS

□ بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الحمد لله الواحد القهار، العزيز الغفار، مكور الليل على النهار، تذكرة لأولي القلوب والأبصار،
وتبصرة لذوي الألباب والاعتبار.

Avant tout propos, nous remercions "□ الله" le tout-puissant de nous avoir donné la capacité et la volonté d'aller jusqu'au bout pour réaliser ce travail.

Nous remercions notre encadreur Dr. MALTI C. pour avoir encadré et dirigé ce travail avec une grande rigueur scientifique, sa disponibilité, ses précieux conseils, la confiance qu'il nous a accordé et pour son suivi régulier durant l'élaboration de ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à Monsieur BRAHMI M. maitre de conférences à l'université de Relizane, pour avoir accepté de présider la soutenance de notre mémoire. Nous le remercions par avance pour l'attention qu'il porter à ce travail, ainsi que pour sa disponibilité et son engagement dans l'évaluation de ce mémoire.

Nous adressons nos vifs remerciements à Madame KEBAL L. maitre-assistant à l'université de Relizane, pour avoir accepté d'évaluer ce travail. Nous lui sommes très reconnaissants pour le temps qu'elle y consacrera, ainsi que pour les remarques et suggestions qu'elle pourra formuler lors de la soutenance.

À tous nos enseignants qui nous ont initié aux valeurs authentiques, en signe d'un profond respect et d'un profond amour.

Nous tenons à remercier nos familles pour leur soutien et leurs encouragements.

Un grand merci particulier à nos collègues et nos amis pour les moments agréables que nous avons passés ensemble. Nous les remercions pour leur confiance, leur disponibilité et leur fidélité.

Enfin, nos profonds remerciements vont à toutes les personnes qui nous ont aidés et soutenus de près ou de loin pour mener à bien ce projet.

Nous vous disons merci.

الملخص

يهدف تثنمين النباتات العطرية والطبية في الجزائر؁ قمنا بدراسة النوع النباتي *Artemisia herba-alba*. في هذا السياق؁ اختبرنا القدرة المضادة للأكسدة والمضادة للالتهابات للزيوت الأساسية المستخلصة من الأجزاء الهوائية لهذا النوع؁ والتي جُمعت من محطتين مختلفتين في منطقة غليزان (شمال غرب الجزائر): غابة أولاد سيدي يحيى وبلدية سيدي محمد بن عودة.

تم تقييم القدرة المضادة للأكسدة باستخدام طريقة اصطياد الجذر الحر 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH))؁ بينما تم تقييم القدرة المضادة للالتهابات باستخدام طريقة تثبيط التمسح لألبومين مصل البقر (BSA). وتم الحصول على الزيت الأساسي عن طريق التقطير المائي.

كشفت نتائج النشاط المضاد للجذور الحرة عن فعالية تعتمد على الجرعة؁ حيث بلغت أعلى نسبة تثبيط عند تركيز 128 ملغ/مل 84.5% لعينة المحطة 1 و78.9% لعينة المحطة 2؁ وكانت قيم Cl_{50} على التوالي 6.78 ملغ/مل و11.34 ملغ/مل؁ مما يشير إلى فعالية أفضل لعينة المحطة الأولى.

أما النشاط المضاد للالتهابات؁ فقد أظهر هو الآخر علاقة طردية مع التركيز. إذ بلغت نسبة التثبيط عند أعلى تركيز (1000 ميكروغرام/مل) 89.7% لعينة المحطة 1 و92.3% لعينة المحطة 2؁ مع قيم Cl_{50} بلغت 67.78 و48.59 ميكروغرام/مل على التوالي؁ مما يدل على فعالية أعلى لعينة المحطة الثانية.

تؤكد هذه الدراسة الإمكانيات الكبيرة للزيت الأساسي المستخرج من *Artemisia herba-alba* كمضاد طبيعي للأكسدة والالتهابات؁ وتسلسل الضوء على تأثير الأصل الجغرافي في فعاليته البيولوجية؁ مما يجعله مرشحًا واعدًا في مجالات الصحة والعلاج الطبيعي.

الكلمات المفتاحية: *Artemisia herba-alba*؁ نشاط مضاد للأكسدة؁ Cl_{50} ؁ DPPH؁ نشاط مضاد للالتهابات؁ تمسخ؁ BSA؁ زيت أساسي؁ غليزان؁ الجزائر

RÉSUMÉ

Dans le but de valoriser les plantes aromatiques et médicinales originaires de l'Algérie, nous nous sommes intéressés à l'étude de l'espèce végétale *Artemisia herba-alba*. Dans ce contexte, nous avons testé le pouvoir antioxydant et anti-inflammatoire des huiles essentielles des parties aériennes de cette espèce, récoltées dans deux stations différentes de la région de Relizane (nord-ouest de l'Algérie) : la forêt de Ouled Sidi Yahia (Boukhabza) et la commune de Sidi M'Hamed Ben Aouda.

Le pouvoir antioxydant a été évalué par la méthode du piégeage du radical 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl (DPPH), tandis que le pouvoir anti-inflammatoire a été mesuré par la méthode d'inhibition de la dénaturation de l'albumine sérique bovine (BSA). L'huile essentielle a été obtenue par hydrodistillation.

Les profils d'activité antiradicalaire ont révélé une action dose-dépendante. L'inhibition maximale à la concentration de 128 mg/ml a atteint 84,5 % pour l'échantillon de la Station 1 et 78,9 % pour celui de la Station 2, avec des CI_{50} respectives de 6,78 mg/ml et 11,34 mg/ml, indiquant une meilleure efficacité pour la Station 1.

Concernant l'activité anti-inflammatoire, les résultats montrent également une réponse dose-dépendante. À 1000 μ g/ml, les pourcentages d'inhibition étaient de 89,7 % pour la Station 1 et 92,3 % pour la Station 2, avec des CI_{50} de 67,78 μ g/ml et 48,59 μ g/ml respectivement, ce qui indique une activité plus marquée pour la Station 2.

Cette étude a permis de confirmer le potentiel antioxydant et anti-inflammatoire de l'huile essentielle d'*Artemisia herba-alba*, une plante médicinale et aromatique abondante en Algérie. Les résultats obtenus mettent en évidence son intérêt en tant qu'agent naturel prometteur pour la santé et le bien-être, tout en soulignant l'influence de l'origine géographique sur son efficacité biologique.

Mots-clés : *Artemisia herba-alba*, activité antioxydante, DPPH, CI_{50} , activité anti-inflammatoire, dénaturation, BSA, huile essentielle, Relizane, Algérie.

ABSTRACT

In order to enhance the value of aromatic and medicinal plants native to Algeria, we focused on the study of the plant species *Artemisia herba-alba*. In this context, we investigated the antioxidant and anti-inflammatory potential of essential oils extracted from the aerial parts of this species, collected from two different sites in the Relizane region (north-western Algeria): the Ouled Sidi Yahia forest (Boukhabza) and the municipality of Sidi M'Hamed Ben Aouda.

The antioxidant activity was assessed using the 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging method, while the anti-inflammatory activity was evaluated through the inhibition of bovine serum albumin (BSA) denaturation. The essential oil was obtained via hydrodistillation.

The radical scavenging profiles showed a dose-dependent activity. At a concentration of 128 mg/ml, the highest inhibition reached 84.5% for the sample from Station 1 and 78.9% for Station 2. The corresponding IC₅₀ values were 6.78 mg/ml and 11.34 mg/ml, indicating slightly higher antioxidant efficiency for Station 1.

Regarding anti-inflammatory activity, a similar dose-dependent response was observed. At the highest concentration tested (1000 µg/ml), inhibition percentages of BSA denaturation were 89.7% for Station 1 and 92.3% for Station 2. The IC₅₀ values were 67.78 µg/ml and 48.59 µg/ml respectively, demonstrating stronger anti-inflammatory activity in the sample from Station 2.

This study confirmed the antioxidant and anti-inflammatory potential of the essential oil derived from the aerial parts of *Artemisia herba-alba*, an aromatic and medicinal plant widely present in Algeria. The results, in agreement with literature data, highlight the promise of this essential oil as a natural agent for health and well-being, while also emphasizing the influence of geographical origin on its biological efficacy.

Keywords: *Artemisia herba-alba*, antioxidant activity, DPPH, IC₅₀, anti-inflammatory activity, denaturation, BSA, essential oil, Relizane, Algeria.

TABLE DES MATIERES

Dédicaces	
Remerciements	
الملخص	
Résumé	
Abstract	
Table des matières	
Liste de figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
INTRODUCTION	2
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	5
Chapitre I : Synthèse bibliographique de la plante étudiée	6
I. Présentation de la plante	6
II. Description botanique	6
III. Systématique de <i>Artemisia herba alba</i>	7
IV. Usages thérapeutiques	8
Chapitre II : Huiles essentielles et activités biologiques	10
I. Les huiles essentielles	10
I.1. Définition et généralités	10
I.2. Propriétés physiques des huiles essentielles	11
I.3. Chimie des huiles essentielles	12
II. Activité biologique des huiles essentielles	13
II.1. Propriétés Antioxydantes des Huiles Essentielles	15
II.1.1. Les Antioxydants et le Stress Oxydatif	15
II.1.2. Activités antioxydantes des huiles essentielles	16
II.2. Propriétés anti-inflammatoires des huiles essentielles	17
II.2.2. Activités anti-inflammatoires des huiles essentielles	18
Chapitre III : Les différentes techniques d'extraction d'huile essentielle	20
I. Les méthodes conventionnelles	20

I.1. Hydrodistillation	20
I.2. Entraînement à la vapeur d'eau	21
I.3. Le pressage à froid	22
II. Les méthodes modernes	23
II.1. Extraction assistée par les ultrasons	23
II.2. Extraction assistée par les micro-ondes	23
II.3. Extraction par CO ₂ supercritique	24
PARTIE EXPÉRIMENTALE	26
I. Objectif de travail	27
II. Matériel végétal	27
II.1. Provenance du matériel végétal	27
II.2. Situation géographique de la zone d'étude	27
II.3. Récolte et conservation des plantes étudiées	28
III. Extraction de l'huile essentielle de la plante étudiée	29
III.1. Procédé d'extraction et conservation de l'huile essentielle	29
III.2. Conservation de l'huile essentielle obtenue	30
III.3. Le rendement	30
IV. Pouvoir antioxydant des huiles essentielles	30
V. Pouvoir antiinflammatoire des huiles essentielles	31
RÉSULTATS ET DISCUSSION	33
I. Propriétés organoleptiques de l'huile essentielle d' <i>Artemisia herba-alba</i>	34
II. Rendements d'extraction	34
III. Pouvoir antioxydant de l'huile essentielle d' <i>Artemisia herba-alba</i>	35
IV. Pouvoir anti-inflammatoire de l'huile essentielle d' <i>Artemisia herba-alba</i>	37
CONCLUSION	41
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	44

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma d'un montage d'hydrodistillation (Guerrouf, 2017)	21
Figure 2 : Schéma d'un montage de distillation à la vapeur d'eau (Goudjil, 2016)	22
Figure 3 : Schéma du dispositif d'hydrodistillation assistée par microondes (Rostagno et Prado, 2013)	24
Figure 4 : Pourcentage d'inhibition du radical libre DPPH en fonction des différentes concentrations de l'huiles essentielles d'Artemisia herba-alba – Station 1 : Forêt de Ouled Sidi Yahia (Boukhabza)	36
Figure 5 : Pourcentage d'inhibition du radical libre DPPH en fonction des différentes concentrations de l'huiles essentielles d'Artemisia herba-alba – Station 2 : Commune de Sidi M'Hamed Ben Aouda	36
Figure 6 : Pourcentage d'inhibition de la dénaturation de l'albumine sérique bovine en fonction des différentes concentrations de l'huiles essentielle d'Artemisia herba-alba - Station 1 : Forêt de Ouled Sidi Yahia (Boukhabza)	38
Figure 7 : Pourcentage d'inhibition de la dénaturation de l'albumine sérique bovine en fonction des différentes concentrations de l'huiles essentielle d'Artemisia herba-alba - Station 2 : Sidi M'Hamed Ben Aouda	39

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Rendements (%) en huile essentielle de Artemisia herba-alba prélevée dans la région de Relizane (Algérie)	34
Tableau 2 : Pourcentages d'inhibition du radical DPPH● par l'huile essentielle d'Artemisia herba-alba	35
Tableau 3 : Valeurs de CI_{50} (mg/ml) pour l'huile essentielle d'Artemisia herba-alba	36
Tableau 4 : Inhibition de la dénaturation de l'albumine sérique bovine par l'huile essentielle d'Artemisia herba-alba	38
Tableau 5 : Pouvoir d'inhibition de la dénaturation de l'albumine sérique bovine de l'huiles essentielle d'Artemisia herba-alba exprimé en CI_{50}	39

LISTE DES ABREVIATIONS

ABTS +• : Acide 2,2'-azino-bis-(3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonique).

BHA : Butylhydroxyanisole

BHT : Butylhydroxytoluène

Cm : Centimètre

C° : Degré Celsius

CCM : Chromatographie sur Couche Mince

CMI : Concentration minimale inhibitrice

DPPH• : Radical 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl.

DMPD : le balayage du radical N, N'-p-di-méthyl-1-phenylenediamine

DROS: Dérivés réactifs de l'oxygène

DO : Densité Optique

ERO : Espèces Réactives de l'Oxygène

FRAP : Ferric Reducing Antioxydant Power.

Fe²⁺ : Ion ferreux

g : Gramme

HE : Huiles Essentielles

IC₅₀ : Concentration d'Inhibitrice 50

Kg : Kilogramme

L : Litre

•OH : Radical hydroxyle.

ORAC : capacité d'absorbance du radical de l'oxygène

PLC : Photo chimiluminescence

PG : Gallate Propylée

Ph. EUR : Pharmacopée Européenne

UV : Ultra-Violet.

μl: Microlitre

SOD : Superoxyde Dismutase

TBHQ : Tetra-butylhydroquinone

INTRODUCTION

Depuis la nuit des temps, les plantes aromatiques occupent une place essentielle dans la pharmacopée traditionnelle de nombreuses civilisations. Utilisées pour leurs propriétés médicinales, culinaires et cosmétiques, ces plantes tirent leur potentiel thérapeutique notamment de la présence de composés secondaires bioactifs, parmi lesquels les huiles essentielles occupent une place prépondérante (**Bakkali *et al.*, 2008**). Ces substances volatiles, extraites principalement par distillation à la vapeur d'eau, sont responsables des arômes caractéristiques des plantes aromatiques et sont largement reconnues pour leurs nombreuses propriétés biologiques (**Burt, 2004**).

Les huiles essentielles, par leur composition complexe en monoterpènes, sesquiterpènes, alcools, phénols, aldéhydes et autres molécules aromatiques, présentent une large gamme d'activités biologiques, dont les plus étudiées sont les propriétés antimicrobiennes, antifongiques, insecticides, antioxydantes et anti-inflammatoires (**Miguel, 2010**). Ces propriétés confèrent aux huiles essentielles un intérêt croissant dans divers domaines d'application, tels que la pharmacie, l'agroalimentaire, la cosmétique et même l'agriculture durable, où elles peuvent constituer des alternatives naturelles aux produits de synthèse (**Burt, 2004**).

L'activité antioxydante constitue l'un des axes majeurs de recherche autour des huiles essentielles. Les antioxydants sont des substances capables de neutraliser les radicaux libres, molécules instables générées naturellement dans l'organisme au cours du métabolisme cellulaire, ou induites par des facteurs environnementaux comme la pollution, les rayonnements UV ou certaines substances toxiques (**Valko *et al.*, 2007 ; Lobo *et al.*, 2010**). Un déséquilibre entre la production de radicaux libres et les mécanismes de défense antioxydante conduit à un stress oxydatif, impliqué dans le vieillissement cellulaire et dans la genèse de nombreuses pathologies chroniques, telles que les maladies cardiovasculaires, les cancers, les maladies neurodégénératives ou encore les inflammations chroniques (**Reuter *et al.*, 2010**).

Face à ces risques, l'utilisation d'antioxydants est devenue une stratégie de choix pour prévenir ou atténuer les effets délétères du stress oxydatif. Cependant, de nombreux antioxydants chimiques utilisés dans l'industrie agroalimentaire et pharmaceutique, comme le butylhydroxyanisole (BHA) ou le butylhydroxytoluène (BHT), suscitent aujourd'hui de fortes préoccupations en raison de leurs effets potentiellement toxiques et cancérigènes (**Branen, 1975**). Cela a conduit la communauté scientifique à orienter ses recherches vers des sources naturelles d'antioxydants, moins toxiques, mieux tolérées par l'organisme, et souvent

biodégradables. Dans cette optique, les huiles essentielles et les extraits de plantes apparaissent comme des candidats prometteurs pour remplacer les antioxydants synthétiques dans divers domaines d'application (**Bakkali et al., 2008**).

Par ailleurs, plusieurs études ont démontré le rôle potentiel des huiles essentielles en tant qu'agents anti-inflammatoires. L'inflammation, réponse biologique de l'organisme à une agression, lorsqu'elle devient chronique, est à l'origine de nombreuses maladies. Les molécules bioactives contenues dans les huiles essentielles agissent notamment en modulant l'expression de médiateurs pro-inflammatoires ou en inhibant certaines voies enzymatiques telles que la cyclooxygénase ou la lipoxygénase, impliquées dans la synthèse des prostaglandines (**Posadas et al., 2006**). Ainsi, les huiles essentielles pourraient constituer une alternative naturelle intéressante aux anti-inflammatoires non stéroïdiens, souvent associés à des effets secondaires importants (**Miguel, 2010**).

L'Algérie, de par sa position géographique et la diversité de ses climats, possède une flore extrêmement riche et variée, comprenant un grand nombre d'espèces endémiques et aromatiques. Parmi ces espèces, ***Artemisia herba-alba***, appartenant à la famille des Astéracées, est largement répandue dans les régions steppiques et semi-arides du pays, notamment dans la région de Relizane. Cette plante médicinale, connue pour ses usages traditionnels dans le traitement de divers troubles (digestifs, respiratoires, cutanés, etc.), est particulièrement riche en composés volatils bioactifs, ce qui en fait une excellente candidate pour l'étude de ses activités biologiques (**Bnouham et al., 2010**).

Dans un contexte de valorisation des ressources naturelles locales et de recherche de solutions alternatives aux produits chimiques de synthèse, il devient crucial de s'intéresser à l'exploration scientifique du potentiel thérapeutique des plantes médicinales algériennes. Une telle démarche s'inscrit non seulement dans une perspective de développement durable, mais également dans une volonté de promotion de la biodiversité nationale à travers une meilleure connaissance, une exploitation raisonnée et une valorisation intégrée de ses ressources végétales.

C'est dans ce cadre que s'inscrit le présent travail, qui vise à évaluer les activités antioxydante et anti-inflammatoire des huiles essentielles extraites d'***Artemisia herba-alba***, récoltée dans la région de Relizane. L'étude permettra de mettre en évidence ses propriétés biologiques, contribuant ainsi à la mise en valeur de cette espèce locale à fort potentiel thérapeutique.

Afin d'atteindre ces objectifs, ce mémoire a été structuré en trois grandes parties. La première partie est consacrée à une revue bibliographique détaillée portant sur les plantes aromatiques, les huiles essentielles, les mécanismes de l'oxydation, les antioxydants naturels et leurs applications thérapeutiques. La deuxième partie présente les matériaux et méthodes expérimentales mises en œuvre pour l'extraction, l'analyse et l'évaluation des activités biologiques de l'huile essentielle de la plante étudiée. Enfin, la troisième partie est dédiée à la présentation des résultats expérimentaux, leur interprétation, et une discussion critique à la lumière des données de la littérature.

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I : Synthèse bibliographique de la plante étudiée

I. Présentation de la plante

Artemisia herba-alba, communément appelée armoise blanche ou « chih » en arabe, est un arbrisseau vivace de la famille des Astéracées. Elle est naturellement adaptée aux zones steppiques et semi-arides d'Afrique du Nord, de la péninsule ibérique jusqu'au Proche-Orient. Atteignant typiquement 30 à 60 cm de hauteur, cette espèce se caractérise par un feuillage argenté dense, composé de feuilles pennées à segments finement découpés, couvertes d'un indumentum laineux qui confère à la plante une teinte gris-vert caractéristique (**Dob et al., 2012**).

Sa période de floraison s'étend de juillet à septembre, mettant en évidence de petits capitules globuleux de 4 à 6 mm, porteurs de deux à cinq fleurs hermaphrodites. L'arôme camphré et puissant dégagé par la plante est dû à la forte teneur en composés volatils, notamment des monoterpènes comme l'eucalyptol (cinéole), et des sesquiterpènes spécifiques selon les chémotypes géographiques (**Messaoud et al., 2015**).

Du point de vue écologique, *A. herba-alba* prospère sur des sols bien drainés, allant des marnes calcaires au sol sableux des zones désertiques, avec une tolérance remarquable à la sécheresse et à la salinité modérée (**Senhaji et al., 2020**). En Algérie, elle couvre une vaste zone géographique s'étendant des hautes plaines steppiques jusqu'aux franges présahariennes, ce qui en fait une composante écologique majeure des écosystèmes locaux (**Benlhabib et al., 2018**).

Botaniquement, *A. herba-alba* appartient à l'ordre des Asterales, à la sous-famille des Asteroideae, tribu des Anthemideae, et au genre *Artemisia*, qui comprend environ 400 espèces dans le monde. Plusieurs travaux ont mis en évidence la complexité taxonomique au sein de l'espèce, en soulignant l'existence de chémotypes et de sous-espèces variées en fonction de l'origine géographique (**Zohary, 2004 ; Dob et al., 2012**).

Enfin, le potentiel agronomique de *A. herba-alba* est notable : utilisée comme fourrage pour les ovins et les bovins dans les steppes algériennes, elle présente un intérêt nutritif malgré un taux de cellulose relativement élevé (17–33 %). Parallèlement, son rôle dans la phytothérapie traditionnelle (digestive, antidiabétique, vermifuge, antispasmodique, etc.) lui confère une place importante au sein de la pharmacopée populaire (**Bnouham et al., 2010**).

II. Description botanique

Artemisia herba-alba est une plante herbacée vivace, parfois décrite comme un arbrisseau nain (chamaephyte), mesurant généralement entre 30 et 60 cm de hauteur. Ses tiges sont rigides, érigées, et portent un feuillage dense composé de feuilles pennées, profondément découpées. Le limbe, de forme ovée à orbiculaire sur les pousses stériles, devient plus réduit sur les tiges florifères, et est recouvert d'un indumentum laineux ou glandulaire, conférant à la plante une teinte gris-blanchâtre caractéristique (**Maghni et al., 2017**).

La période de floraison s'étend de septembre à décembre (en parties nord-africaines), parfois dès juillet selon le climat local. Les capitules floraux, sessiles et oblongs, sont organisés en grappes lâches. Ils mesurent seulement 4 à 6 mm de diamètre et renferment entre 2 et 5 fleurs herma/radiées, jaune pâle, typiques de la famille des Astéracées.

Un des traits remarquables de *A. herba-alba* est sa grande variabilité morphologique : les études menées en Algérie sur plus de 120 individus, notamment à l'ouest du pays, ont mis en évidence une forte polymorphie intra- et inter-populationnelle concernant des caractères quantitatifs (taille des feuilles, angle des rameaux) et qualitatifs (densité de l'indumentum, forme des capitules). Cette plasticité phénotypique est vraisemblablement une réponse adaptative aux variations des conditions écologiques, telles que l'altitude, la nature du sol ou l'humidité (**Maghni et al., 2017**).

Sur le plan anatomique, certaines populations présentent un parenchyme de réserve hydrique, reflétant une adaptation structurale à la sécheresse fréquente des milieux steppiques. Cette structure permet à la plante d'accumuler et de maintenir l'eau en période aride, conférant ainsi une tolérance significative aux conditions semi-arides à sahariennes (**Abderabbi et al., 2018**).

III. Systématique de *Artemisia herba alba*

Artemisia herba-alba est un angiosperme appartenant à l'ordre des Asterales et à la famille Asteraceae, plus précisément à la sous-famille Asteroideae, tribu Anthemideae, sous-tribu Artemisiinae, genre *Artemisia*, sous-genre *Seriphidium*. Cette classification phylogénétique est fondée sur des analyses morphologiques et moléculaires notamment basées sur les séquences ITS (Internal Transcribed Spacer) du ribosomal DNA (**Pellicer et al., 2011; Abdelkader et al., 2018**).

- **Royaume** : Plantae

- **Superdivision** : Spermatophyta
- **Division** : Magnoliophyta (Angiospermes)
- **Classe** : Magnoliopsida
- **Ordre** : Asterales
- **Famille** : Asteraceae
- **Sous-famille** : Asteroideae
- **Tribu** : Anthemideae
- **Sous-tribu** : Artemisiinae
- **Genre** : *Artemisia* L.
- **Espèce** : *Artemisia herba-alba*.

Des méthodes de phylogénie moléculaire, incluant les marqueurs ITS et régions cpDNA, ont montré que le genre *Artemisia*, et spécifiquement *A. herba-alba*, présente une remarquable cohérence génétique au sein de sa vaste aire de répartition, malgré sa grande variabilité morphologique. **Ling et al. (2005)** ont ainsi démontré la monophylie de la sous-tribu Artemisiinae, avec une origine eurasiennne ancienne, confirmée par des fossiles polliniques datant de l'Oligocène. Par ailleurs, la distinction entre les sous-genres d'*Artemisia* est renforcée par les divergences dans les séquences ITS et les données phénologiques, consolidant l'inclusion d'*A. herba-alba* dans *Seriphidium* (**Premoli et al., 2012**).

Sur le plan systématique interne, *A. herba-alba* est une espèce complexe, parfois considérée comme un "complexe d'espèces" du fait de la coexistence de plusieurs chémotypes et sous-espèces, reflétant une adaptation locale aux conditions environnementales. L'existence de chémotypes (profil chimique des huiles essentielles) distincts dans différentes populations, comme documenté en Algérie, au Maghreb et en Espagne — illustre la plasticité adaptative de cette espèce sur le plan métabolique (**Younsi et al., 2017**).

Cette stabilité génomique combinée à une forte diversité phénotypique et chimique constitue un avantage pour la phytothérapie et l'exploitation industrielle : en effet, la sélection par chémotype permet d'optimiser l'extraction d'huiles essentielles à visée antioxydante, anti-inflammatoire ou antimicrobienne. D'un point de vue scientifique, cette complexité systématique mérite une attention particulière, car elle impose une rigueur taxonomique et génotypique dans les études comparatives (**Salido et al., 2004**).

IV. Usages thérapeutiques

Artemisia herba-alba occupe une place importante dans la pharmacopée traditionnelle des régions arides et semi-arides d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient. Son usage remonte à plusieurs siècles, transmis de génération en génération au sein des communautés rurales et nomades (**Bellakhdar, 1997 ; Benarba et al., 2013**). En Algérie, cette plante est particulièrement valorisée par les populations des Hauts Plateaux, du Tell steppique et du Sahara septentrional, notamment dans les régions comme Djelfa, Laghouat, Naâma, El Bayadh et Relizane (**Akrout et al., 2010**).

Dans la médecine populaire nord-africaine, *A. herba-alba* est principalement utilisée pour ses vertus digestives, antispasmodiques, antiparasitaires et antiseptiques. Elle est souvent administrée sous forme d'infusion ou de décoction de feuilles et de sommités fleuries (**Benarba et al., 2013 ; Hseini et al., 2021**). Parmi les usages les plus fréquents, on trouve le traitement :

- ✓ des troubles gastro-intestinaux (coliques, douleurs d'estomac, flatulences),
- ✓ des parasitoses intestinales comme les vers,
- ✓ de la toux et des affections respiratoires bénignes,
- ✓ des infections cutanées et plaies, en usage externe,
- ✓ et des douleurs articulaires ou rhumatismales (en cataplasme ou décoction).

Selon les résultats d'enquêtes ethnobotaniques menées au Maghreb, y compris en Tunisie et au Maroc, la plante est également utilisée pour ses effets antidiabétiques, en particulier chez les personnes âgées (**Benarba et al., 2013 ; Bellakhdar, 1997**).

En Algérie, plusieurs études ethnobotaniques ont mis en lumière l'usage intensif de *Artemisia herba-alba* par les populations locales, notamment dans les zones steppiques et présahariennes. Une étude menée dans la région de Djelfa par **Akrout et al. (2010)** a révélé que cette espèce fait partie des plantes les plus fréquemment citées par les guérisseurs traditionnels pour le traitement de troubles digestifs et comme vermifuge. Elle est aussi réputée pour soulager les douleurs menstruelles et stimuler l'appétit.

Dans les régions rurales de Relizane, où la plante pousse à l'état spontané, les populations utilisent encore aujourd'hui *A. herba-alba* pour :

- ✓ soulager les ballonnements et les troubles digestifs légers (en infusion),
- ✓ traiter les plaies ou les piqûres d'insectes (en application topique),
- ✓ réduire la fièvre (infusion chaude),

- ✓ purifier l'air et éloigner les insectes (brûlage des feuilles sèches),
- ✓ et en tant que tonique général durant les périodes de fatigue saisonnière.

Ces pratiques témoignent de la transmission orale et empirique du savoir phytothérapeutique dans les foyers ruraux, en l'absence d'un recours systématique à la médecine conventionnelle (**Bouasla et Bouasla, 2017 ; Hseini *et al.*, 2021**).

Chapitre II : Huiles essentielles et activités biologiques

I. Les huiles essentielles

I.1. Définition et généralités

Les huiles essentielles (HE) sont des mélanges complexes de composés organiques volatils, extraits principalement de parties aromatiques des plantes telles que les feuilles, les fleurs, les tiges, les racines, les fruits ou les écorces. Ce sont des substances hydrophobes, généralement liquides à température ambiante, caractérisées par une forte odeur due à leur richesse en composés aromatiques. Elles sont obtenues essentiellement par distillation à la vapeur d'eau, expression à froid (notamment pour les zestes d'agrumes), ou par extraction à l'aide de solvants dans certains cas particuliers (**Bakkali *et al.*, 2008**).

Sur le plan fonctionnel, les huiles essentielles remplissent plusieurs rôles physiologiques et écologiques chez la plante. Elles participent à la défense contre les pathogènes (champignons, bactéries, insectes), agissent comme attractifs ou répulsifs vis-à-vis des pollinisateurs et des herbivores, et jouent un rôle dans les communications inter- et intra-espèces (**Pichersky et Gershenzon, 2002**).

Leur utilisation par l'Homme remonte à l'Antiquité, dans les domaines de la médecine, de la parfumerie, de la cosmétique, de l'aromathérapie et plus récemment dans les industries agroalimentaire et pharmaceutique. Les huiles essentielles sont aujourd'hui reconnues pour leurs nombreuses activités biologiques, parmi lesquelles on peut citer :

- Antimicrobienne (antibactérienne, antifongique, antivirale),
- Antioxydante (capacité à piéger les radicaux libres),
- Anti-inflammatoire,
- Antiparasitaire et insecticide,
- Spasmolytique et carminative,
- Immunomodulatrice (**Bassolé et Juliani, 2012**).

Ces activités sont le résultat de l'action synergique ou antagoniste de leurs différents constituants, principalement des monoterpènes, sesquiterpènes et de leurs dérivés oxygénés (**Burt, 2004**). Contrairement aux principes actifs isolés, les huiles essentielles agissent en synergie, ce qui peut renforcer leur efficacité et limiter l'apparition de résistances, notamment dans le contexte de la lutte contre les agents pathogènes multirésistants (**Bassolé et Juliani, 2012**).

En raison de leur efficacité et de leur origine naturelle, les huiles essentielles suscitent un intérêt croissant dans la recherche de nouvelles alternatives aux composés chimiques de synthèse, souvent critiqués pour leur toxicité, leur impact environnemental et la montée de résistances. Cette dynamique s'inscrit dans une tendance globale vers une valorisation des substances bioactives issues de la flore naturelle, en particulier dans les régions riches en biodiversité comme l'Algérie.

1.2. Propriétés physiques des huiles essentielles

Les huiles essentielles, substances volatiles extraites de plantes aromatiques, sont constituées majoritairement de composés organiques de faible poids moléculaire tels que les monoterpènes, sesquiterpènes et leurs dérivés oxygénés. Ces composés confèrent aux huiles essentielles des propriétés physiques particulières qui les distinguent des huiles fixes (ou graisses végétales), non volatiles et de nature plus stable (**Degryse et al., 2008**).

À température ambiante, les huiles essentielles se présentent généralement sous forme liquide, claires à légèrement colorées, avec une viscosité faible et une forte odeur caractéristique. Leur volatilité élevée, due à la nature chimique de leurs constituants, leur permet de se diffuser facilement dans l'air, ce qui justifie leur usage répandu en aromathérapie et parfumerie (**Couic-Marinier et al., 2013**). Contrairement aux huiles fixes, elles ne laissent pas de film gras après évaporation, ce qui confirme leur caractère éthéré.

Sur le plan de la solubilité, les huiles essentielles sont insolubles dans l'eau, mais elles peuvent être entraînées par la vapeur lors de la distillation hydrodistillatoire, méthode la plus courante d'extraction. Leur lipophilie explique leur grande solubilité dans les solvants organiques usuels comme l'éthanol, l'éther, le chloroforme ou les huiles végétales, ce qui facilite leur incorporation dans diverses formulations galéniques (**Burt, 2004 ; Chemat et al., 2019**).

La densité des huiles essentielles varie en général entre 0,850 et 0,990 g/cm³, inférieure à celle de l'eau, ce qui les fait flotter en surface dans un milieu aqueux. Certaines exceptions existent, notamment pour des huiles contenant des composés oxygénés en proportion élevée, comme l'huile de cannelle (**Desmares et al., 2008**).

L'**indice de réfraction** constitue un autre paramètre physique important. Il reflète la capacité de l'huile à dévier un rayon lumineux incident. Ce paramètre, généralement compris entre 1,450 et 1,550, est influencé par la concentration en composés aromatiques insaturés

et par la température. Il est utilisé en contrôle qualité pour détecter les adultérations ou confirmer l'authenticité d'une huile essentielle (**Lis-Balchin, 2006**).

Sur le plan organoleptique, les huiles essentielles présentent une gamme de couleurs allant du jaune pâle (comme l'huile de romarin ou de lavande) au rougeâtre ou brun (comme les huiles de cannelle ou de thym thymol). Cette coloration dépend de la présence de certains pigments naturels ou de composés phénoliques spécifiques (**Couic-Marinier et al., 2013**).

Il est important de souligner que les huiles essentielles sont **chimiquement instables**. Elles sont particulièrement sensibles à l'oxydation, à la lumière, à l'humidité et à la chaleur, ce qui peut entraîner la dégradation de certains composants, la formation de peroxydes ou de produits irritants, et donc une perte de leur efficacité thérapeutique. Une conservation rigoureuse dans des flacons hermétiques, en verre ambré, à l'abri de la lumière et à température modérée est donc indispensable pour préserver leurs qualités physico-chimiques et biologiques (**Bakkali et al., 2008**).

Ces propriétés physiques conditionnent non seulement leur manipulation et leur stockage, mais aussi leur biodisponibilité et leur efficacité lorsqu'elles sont utilisées en médecine traditionnelle, en aromathérapie, en cosmétologie ou dans l'industrie agroalimentaire.

I.3. Chimie des huiles essentielles

Les huiles essentielles sont des mélanges naturels complexes constitués principalement de composés organiques volatils issus du métabolisme secondaire des plantes. Leur composition chimique est extrêmement variable selon l'espèce végétale, l'organe distillé, les conditions écologiques et les méthodes d'extraction utilisées. Cette complexité est à la base de leurs propriétés sensorielles et biologiques variées (**Bakkali et al., 2008 ; Chemat et al., 2019**).

1. Constituants majeurs des huiles essentielles

Les constituants des huiles essentielles peuvent être regroupés en deux grandes familles principales selon leur origine biogénétique :

- Les composés terpéniques, largement majoritaires, sont des hydrocarbures insaturés formés par la condensation de plusieurs unités isopréniques (C_5H_8). On distingue principalement :
 - Les monoterpènes (C_{10}), tels que le limonène, le pinène ou le myrcène, qui représentent les constituants volatils les plus courants.

- Les sesquiterpènes (C₁₅), comme le β -caryophyllène ou le germacrène, moins volatils mais contribuant fortement à l'activité biologique.
- Leurs dérivés oxygénés (alcools, cétones, aldéhydes, esters, oxydes, lactones, etc.), qui jouent un rôle clé dans les propriétés pharmacologiques et aromatiques des huiles essentielles (**Lis-Balchin, 2006 ; Baser et Buchbauer, 2010**).
- Les composés phénylpropanoïdes, moins fréquents mais biologiquement actifs, dérivent de la voie du shikimate. Ils incluent des molécules comme l'eugénol, le safrole, le cinnamaldéhyde ou l'alcool cinnamique, typiquement retrouvés dans les huiles de girofle, de cannelle ou de basilic (**Couic-Marinier et al., 2013**).

2. Composés secondaires et produits de dégradation

Outre les composés majeurs, les huiles essentielles peuvent également contenir des composés mineurs ou traces issus :

- de réactions enzymatiques ou de transformations post-extraction (oxydation, isomérisation, hydrolyse),
- de produits de dégradation thermique ou oxydative, surtout si l'huile est mal conservée.

Ces produits secondaires incluent des acides carboxyliques, phénols, quinones, ou encore peroxydes, qui peuvent altérer les propriétés organoleptiques ou biologiques des huiles essentielles et, dans certains cas, induire des effets indésirables (**Bakkali et al., 2008**).

3. Complexité et synergie chimique

La diversité et la complexité chimique des huiles essentielles ne reposent pas uniquement sur la présence de composants actifs individuels, mais également sur leurs interactions synergiques ou antagonistes. Cette synergie entre composés, souvent observée entre un monoterpène et un alcool terpénique, peut renforcer certaines activités biologiques comme l'action antimicrobienne, antioxydante ou anti-inflammatoire (**Bassolé et Juliani, 2012**).

4. Intérêt en recherche et applications

L'étude approfondie de la chimie des huiles essentielles permet de comprendre et de prédire leur activité pharmacologique. En effet, des composés comme le 1,8-cinéole, le carvacrol, ou le thymol, bien identifiés chimiquement, sont aujourd'hui reconnus pour leurs effets antibactériens, antifongiques, antioxydants ou anti-inflammatoires. Cette richesse

chimique ouvre ainsi de vastes perspectives en pharmacognosie, en cosmétique naturelle et dans l'élaboration de conservateurs alimentaires alternatifs (**Baser et Buchbauer, 2010 ; Chemat et al., 2019**).

II. Activité biologique des huiles essentielles

Les huiles essentielles, produits naturels issus du métabolisme secondaire des plantes aromatiques, suscitent un intérêt croissant dans les domaines de la pharmacologie, de la cosmétologie, de l'agroalimentaire et de la médecine traditionnelle. Leur richesse en composés bioactifs, tels que les monoterpènes, les sesquiterpènes, les phénols, les aldéhydes ou encore les esters, leur confère une large gamme d'activités biologiques documentées par de nombreuses études scientifiques (**Bakkali et al., 2008 ; Miguel, 2010**).

Parmi les propriétés pharmacologiques les plus largement reconnues des huiles essentielles, on retrouve tout d'abord leur activité antimicrobienne à large spectre, incluant des effets antibactériens, antifongiques et antiviraux, qui ont été démontrés pour de nombreuses espèces végétales (**Burt, 2004**). Elles possèdent également des propriétés antioxydantes importantes, attribuées à leur capacité à piéger les radicaux libres et à prévenir les dommages oxydatifs au niveau cellulaire, contribuant ainsi à la protection contre diverses maladies dégénératives (**Viuda-Martos et al., 2010**). Par ailleurs, les huiles essentielles exercent des effets anti-inflammatoires notables, en agissant sur les voies de signalisation inflammatoires et en modulant la production de médiateurs tels que les prostaglandines, les cytokines et les enzymes pro-inflammatoires (**Posadas et al., 2006**).

En plus de ces effets bien documentés, plusieurs huiles essentielles présentent également des activités antitumorales, notamment par induction de l'apoptose, inhibition de la prolifération cellulaire ou par effet cytotoxique direct sur les cellules cancéreuses (**Edris, 2007 ; Sharifi-Rad et al., 2017**). Des études ont également mis en évidence leurs effets antiparasitaires, notamment contre le *Plasmodium*, *Trypanosoma* et certains helminthes (**Santoro et al., 2007**). À cela s'ajoutent des propriétés spasmolytiques, anxiolytiques, antidépressives, analgésiques, immunomodulatrices et même neuroprotectrices, qui font des huiles essentielles des candidats prometteurs dans la prévention ou l'accompagnement de nombreuses pathologies chroniques et inflammatoires (**De Lira Mota et al., 2012 ; Miguel, 2010 ; Salehi et al., 2019**). Cette diversité fonctionnelle, largement tributaire de leur richesse chimique, justifie l'intérêt scientifique croissant pour leur valorisation dans le cadre d'une pharmacopée naturelle moderne.

La diversité des effets biologiques des huiles essentielles dépend étroitement de leur composition chimique, qui peut varier selon l'espèce végétale, la partie de la plante utilisée, le stade de développement, ainsi que la méthode d'extraction.

Face aux limites des traitements conventionnels, aux effets indésirables de certains composés chimiques de synthèse et à la résistance croissante des agents pathogènes, les huiles essentielles apparaissent comme une source prometteuse de principes actifs naturels, potentiellement valorisables dans le cadre de la phytothérapie moderne et de la recherche de nouvelles alternatives thérapeutiques.

Dans le présent travail, l'attention est portée plus particulièrement sur deux activités biologiques majeures des huiles essentielles : leur activité antioxydante et leur activité anti-inflammatoire, qui constituent les axes principaux de notre étude. Ces propriétés sont d'un intérêt particulier dans la prévention et le traitement de nombreuses pathologies chroniques, en lien avec le stress oxydatif et l'inflammation, deux phénomènes physiopathologiques étroitement associés.

Les sections suivantes seront donc consacrées à la présentation du stress oxydatif et de la réponse inflammatoire, puis à l'examen des connaissances actuelles sur le potentiel antioxydant et anti-inflammatoire des huiles essentielles, avec une attention particulière portée à celles issues de la plante *Artemisia herba-alba*, objet de notre investigation.

II.1. Propriétés Antioxydantes des Huiles Essentielles

II.1.1. Les Antioxydants et le Stress Oxydatif

Le stress oxydatif est défini comme un déséquilibre entre la production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS – *Reactive Oxygen Species*) et les mécanismes de défense antioxydants de l'organisme. Les ROS comprennent notamment l'anion superoxyde ($O_2^{\bullet-}$), le radical hydroxyle ($\bullet OH$) et le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), qui sont générés au cours de processus physiologiques normaux, comme la respiration cellulaire, mais aussi en réponse à divers facteurs exogènes tels que la pollution, les radiations UV, les toxines, ou les infections (Valko *et al.*, 2007).

Lorsque leur production excède les capacités de neutralisation des systèmes antioxydants, ces espèces peuvent endommager les biomolécules essentielles comme les lipides, les protéines et l'ADN, entraînant une peroxydation lipidique, des altérations enzymatiques et des mutations génétiques. Ce phénomène est fortement impliqué dans la physiopathologie de nombreuses affections humaines chroniques, notamment les maladies

neurodégénératives (Parkinson, Alzheimer), les cancers, les maladies cardiovasculaires, le diabète de type 2, ainsi que le vieillissement prématuré (**Lobo et al., 2010 ; Reuter et al., 2010**).

Pour contrer ces effets délétères, l'organisme dispose de systèmes de défense antioxydants, enzymatiques (superoxyde dismutase, catalase, glutathion peroxydase) et non enzymatiques (glutathion, vitamines C et E, acide urique, flavonoïdes, etc.) (**Pisoschi et Pop, 2015**). Cependant, ces mécanismes peuvent être insuffisants en cas d'agression oxydative massive, d'où l'intérêt de renforcer la protection antioxydante par des apports exogènes.

Traditionnellement, cette supplémentation s'est faite à l'aide d'antioxydants de synthèse tels que le butylhydroxyanisole (BHA), le butylhydroxytoluène (BHT) ou le propyl gallate. Toutefois, plusieurs études ont mis en lumière la toxicité potentielle de ces composés, suspectés d'être cancérogènes ou perturbateurs endocriniens à long terme (**Ito et al., 1983 ; Branen, 1975**). Cette problématique a conduit à une orientation marquée vers la recherche d'antioxydants naturels, plus sûrs et biocompatibles.

Dans ce contexte, les huiles essentielles apparaissent comme une source prometteuse de molécules antioxydantes naturelles, grâce à leur richesse en composés phénoliques, en terpénoïdes et en aldéhydes aromatiques capables de piéger les radicaux libres, de chélater les métaux pro-oxydants et d'inhiber les réactions d'oxydation en chaîne (**Bakkali et al., 2008 ; Miguel, 2010**). Cette activité antioxydante naturelle, associée à une faible toxicité, ouvre la voie à de nombreuses applications thérapeutiques et industrielles dans les domaines de la santé, de la nutrition et de la cosmétique.

II.1.2. Activités antioxydantes des huiles essentielles

Les huiles essentielles, grâce à leur composition complexe en composés bioactifs volatils, constituent une source naturelle intéressante d'antioxydants. Leur activité antioxydante est principalement attribuée à la présence de composés phénoliques tels que le thymol, le carvacrol, l'eugénol, ainsi qu'à certains monoterpènes et sesquiterpènes comme le limonène, le linalol, ou le 1,8-cinéole (**Miguel, 2010 ; Viuda-Martos et al., 2010**). Ces substances agissent selon plusieurs mécanismes, notamment la neutralisation directe des radicaux libres, la chélation des ions métalliques pro-oxydants (Fe^{2+} , Cu^{2+}), ainsi que l'inhibition des réactions d'oxydation en chaîne au niveau lipidique et protéique (**Bakkali et al., 2008**).

De nombreuses études in vitro ont mis en évidence la capacité des huiles essentielles à réduire les radicaux libres dans des systèmes modèles utilisant des tests standards tels que DPPH (2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl), ABTS•⁺ (2,2'-azino-bis(3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonique)), FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power) ou ORAC (Oxygen Radical Absorbance Capacity) (**Gülçin et al., 2007 ; Ruberto et Baratta, 2000**). Par exemple, l'huile essentielle d'*Origanum vulgare* riche en carvacrol et thymol, ou celle de *Thymus vulgaris*, a montré une puissante capacité de piégeage des radicaux libres, dépassant parfois celle de certains antioxydants synthétiques comme le BHT (**Bozin et al., 2006**).

En plus de leur efficacité antioxydante démontrée in vitro, plusieurs huiles essentielles ont révélé leur capacité à prévenir ou atténuer les dommages oxydatifs in vivo. Par exemple, l'huile essentielle de *Rosmarinus officinalis* (romarin), grâce à ses composés tels que le 1,8-cinéole et l'acide carnosique, a montré une réduction significative du stress oxydatif chez des animaux de laboratoire exposés à des agents pro-oxydants (**del Baño et al., 2003**). D'autres huiles, comme celles de *Lavandula angustifolia* ou *Cinnamomum zeylanicum*, présentent également des effets protecteurs sur les lipides membranaires, les enzymes antioxydantes endogènes et les marqueurs de l'inflammation oxydative (**Soković et al., 2010 ; Nogueira de Melo et al., 2011**).

En outre, il a été observé que l'activité antioxydante des huiles essentielles est influencée par plusieurs facteurs, notamment leur origine botanique, leur composition chimique, les conditions de culture de la plante, la méthode d'extraction employée, ainsi que les conditions de stockage (**Burt, 2004 ; Dorman et Deans, 2000**). Cela justifie l'importance de caractériser précisément chaque huile essentielle afin d'évaluer son potentiel thérapeutique et de garantir son efficacité.

II.2. Propriétés anti-inflammatoires des huiles essentielles

II.2.1. Réponse inflammatoire et mécanismes

L'inflammation est une réponse biologique complexe, coordonnée par le système immunitaire, en réaction à une agression exogène (infection, toxines, allergènes) ou endogène (lésions tissulaires, cellules tumorales, stress oxydatif). Elle constitue un mécanisme fondamental de défense visant à restaurer l'homéostasie de l'organisme en éliminant l'agent pathogène ou le tissu lésé, puis en engageant les processus de réparation (**Medzhitov, 2008**).

La réponse inflammatoire implique une série d'événements cellulaires et moléculaires finement régulés. Elle débute par l'activation des cellules sentinelles (macrophages, cellules

dendritiques, mastocytes) qui reconnaissent les signaux de danger via des récepteurs de type PRRs (*Pattern Recognition Receptors*), tels que les TLRs (*Toll-Like Receptors*). Cette reconnaissance déclenche la libération immédiate de médiateurs pro-inflammatoires comme les cytokines (TNF- α , IL-1 β , IL-6), les chimiokines, les prostaglandines (PGE₂), les leucotriènes et l'oxyde nitrique (NO) **(Nathan et Ding, 2010 ; Medzhitov, 2010)**.

Ces médiateurs assurent le recrutement des cellules immunitaires circulantes (neutrophiles, monocytes, lymphocytes) vers le site d'inflammation. Ce processus repose sur l'activation de l'endothélium vasculaire, l'augmentation de la perméabilité capillaire, ainsi que sur les interactions entre molécules d'adhésion cellulaire (ICAM-1, VCAM-1) (Libby, 2007). Les cellules recrutées participent ensuite à la phagocytose, à la production de ROS et à la libération de médiateurs secondaires, intensifiant la réponse inflammatoire.

L'inflammation est habituellement autolimitée. Une fois l'agent causal éliminé, des mécanismes de résolution s'activent, impliquant des cytokines anti-inflammatoires (IL-10, TGF- β), des lipoxines, et une reprogrammation des macrophages vers un phénotype réparateur (M2). Toutefois, une réponse prolongée ou dérégulée peut mener à une inflammation chronique, à l'origine de nombreuses pathologies telles que l'arthrite rhumatoïde, la maladie d'Alzheimer, l'athérosclérose, ou certaines formes de cancer **(Nathan et Ding, 2010 ; Hunter et Jones, 2015)**.

La régulation de l'inflammation repose ainsi sur l'équilibre entre les médiateurs pro- et anti-inflammatoires. Dans ce contexte, le recours à des agents anti-inflammatoires naturels, notamment d'origine végétale comme les huiles essentielles, constitue une stratégie thérapeutique prometteuse. Ces dernières sont capables d'agir à différents niveaux du processus inflammatoire, notamment en modulant la production de cytokines, en inhibant les enzymes pro-inflammatoires telles que la cyclooxygénase (COX) et la lipoxygénase (LOX), ou encore en réduisant le stress oxydatif qui entretient l'inflammation **(Miguel, 2010 ; Sharifi-Rad et al., 2017)**.

II.2.2. Activités anti-inflammatoires des huiles essentielles

Les huiles essentielles ont suscité un intérêt croissant pour leurs effets anti-inflammatoires, attribués à leur richesse en composés bioactifs tels que les monoterpènes (comme le thymol, le carvacrol, le linalol, le 1,8-cinéole), les sesquiterpènes (comme le β -caryophyllène) et certains composés phénoliques **(Miguel, 2010 ; Bakkali et al., 2008)**. Ces

molécules possèdent la capacité d'intervenir à divers niveaux du processus inflammatoire, ce qui confère aux huiles essentielles un potentiel thérapeutique polyvalent.

Plusieurs études *in vitro* et *in vivo* ont démontré que certaines huiles essentielles peuvent inhiber la production de cytokines pro-inflammatoires telles que le TNF- α , l'IL-1 β et l'IL-6, tout en favorisant la libération de cytokines anti-inflammatoires comme l'IL-10 (**Posadas et al., 2006 ; Sharifi-Rad et al., 2017**). De plus, elles modulent les voies de signalisation intracellulaire impliquées dans l'inflammation, notamment la voie NF- κ B (*Nuclear Factor kappa B*), qui joue un rôle clé dans l'expression des gènes pro-inflammatoires.

Certaines huiles essentielles, comme celles d'*Eucalyptus globulus*, *Lavandula angustifolia*, ou *Melaleuca alternifolia*, ont montré une capacité à inhiber l'activité de la cyclooxygénase-2 (COX-2) et de la lipoxygénase (LOX), enzymes impliquées dans la biosynthèse des prostaglandines et des leucotriènes, médiateurs majeurs de la réponse inflammatoire (**Bayala et al., 2014 ; Nogueira de Melo et al., 2011**). Cette inhibition contribue à réduire l'œdème, la douleur et la vasodilatation observés lors des processus inflammatoires aigus.

Par ailleurs, des travaux ont mis en évidence que certaines huiles essentielles peuvent diminuer l'expression de l'oxyde nitrique synthase inducible (iNOS) et, par conséquent, réduire la production de NO, un médiateur pro-inflammatoire et pro-oxydant (**Trombetta et al., 2005**). L'effet combiné anti-inflammatoire et antioxydant de ces huiles contribue ainsi à limiter les dommages tissulaires induits par le stress oxydatif chronique associé à l'inflammation persistante.

Des expérimentations animales ont confirmé ces effets. Par exemple, l'administration d'huile essentielle de thym a permis de réduire significativement l'œdème de la patte chez les rats traités à la carragénine, un modèle standard d'inflammation aiguë (**Posadas et al., 2006**). De même, l'huile essentielle de camomille a été rapportée pour diminuer l'infiltration leucocytaire et l'exsudation dans des modèles de péritonite murine (**Srivastava et al., 2010**).

Chapitre III : Les différentes techniques d'extraction d'huile essentielle

L'extraction des huiles essentielles constitue une étape cruciale pour l'étude et la valorisation des propriétés biologiques des plantes aromatiques. Ces composés volatils, responsables de l'arôme et de nombreuses activités biochimiques des végétaux, doivent être isolés avec le plus grand soin afin de préserver leur intégrité chimique et leur activité biologique. Le choix de la méthode d'extraction influence considérablement le rendement, la qualité et la composition chimique des huiles essentielles obtenues (**Chemat et al., 2012**).

Historiquement, les techniques d'extraction reposaient sur des procédés dits *conventionnels*, comme l'hydrodistillation ou l'entraînement à la vapeur d'eau, encore largement utilisés en raison de leur simplicité et de leur efficacité. Toutefois, ces procédés présentent certaines limites, notamment en ce qui concerne la dégradation thermique des composés sensibles, les faibles rendements ou encore la consommation énergétique élevée (**Boutekedjiret et al., 2003**).

Face à ces inconvénients, la recherche a développé ces dernières années des approches dites *innovantes*, comme l'extraction assistée par ultrasons, par micro-ondes ou encore l'extraction au dioxyde de carbone supercritique. Ces techniques, plus respectueuses des composés bioactifs, s'inscrivent dans une logique d'optimisation de la qualité des extraits et de durabilité des procédés (**Reverchon et De Marco, 2006**).

Dans ce chapitre, nous présenterons successivement les méthodes conventionnelles d'extraction des huiles essentielles, puis les techniques modernes, en mettant l'accent sur leurs principes, avantages, inconvénients et domaines d'application.

I. Les méthodes conventionnelles

I.1. Hydrodistillation

L'hydrodistillation est l'une des plus anciennes et des plus répandues des techniques traditionnelles d'extraction des huiles essentielles à partir de plantes aromatiques. Elle repose sur le principe de la co-distillation à la vapeur d'eau, et se décline en trois variantes principales : l'hydrodistillation simple, l'hydrolyse et la distillation à la vapeur entraînée. Cette méthode est notamment codifiée dans plusieurs pharmacopées, dont la *Pharmacopée Européenne* et la *Pharmacopée Française* (**European Pharmacopoeia, 2020**).

Le procédé consiste à immerger ou à placer les parties végétales (fleurs, feuilles, tiges ou racines) dans de l'eau, qui est ensuite portée à ébullition. La chaleur provoque la libération des composés volatils contenus dans les structures glandulaires de la plante (poches

sécrétrices, trichomes, canaux ou cavités). La vapeur d'eau ainsi enrichie en composés volatils est ensuite condensée dans un serpentin réfrigérant, puis récupérée sous forme d'un mélange biphasique : l'huile essentielle (moins dense que l'eau) surnage généralement à la surface de l'eau de distillation (appelée *hydrolat* ou *eau florale*) (Chemat et al., 2006 ; Ferhat et al., 2007).

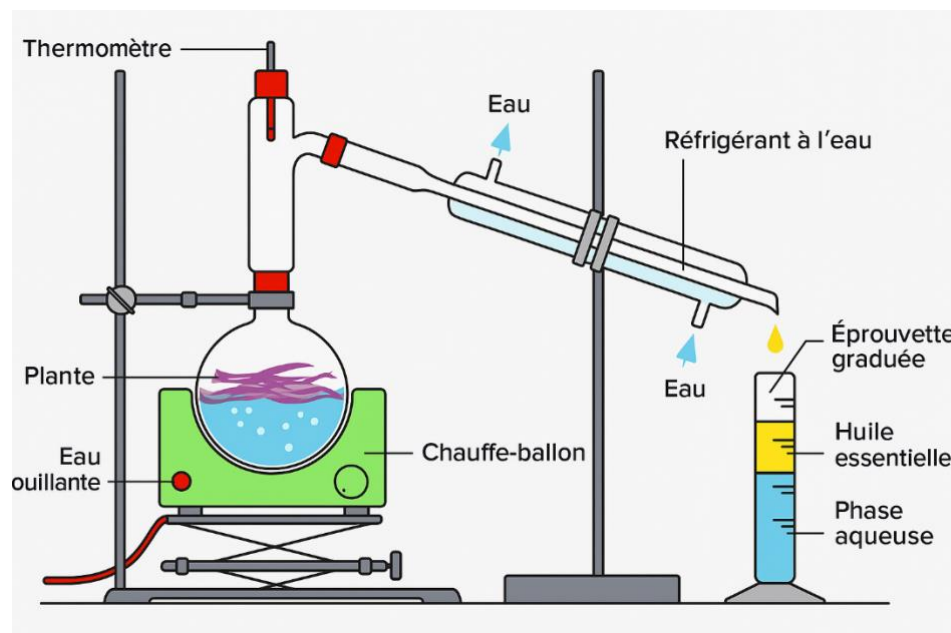


Figure 1 : Schéma d'un montage d'hydrodistillation (Guerrouf, 2017)

I.2. Entraînement à la vapeur d'eau

L'entraînement à la vapeur d'eau est une méthode conventionnelle d'extraction des huiles essentielles largement utilisée à l'échelle industrielle et semi-industrielle. Elle repose sur la volatilisation sélective des composés aromatiques à l'aide de vapeur d'eau, suivie d'une condensation et d'une séparation de la phase huileuse. Contrairement à l'hydrodistillation, où le matériel végétal est immergé dans l'eau bouillante, cette technique consiste à faire passer de la vapeur d'eau à travers la matière végétale placée dans un ballon ou un réacteur spécifique sans contact direct avec l'eau liquide (Chemat et al., 2006 ; Ferhat et al., 2007).

Cette méthode exploite le principe selon lequel la vapeur d'eau permet de réduire le point d'ébullition des composés volatils, même ceux thermolabiles, tout en évitant une dégradation excessive. Elle est particulièrement adaptée aux plantes contenant des huiles essentielles riches en composés volatils hydrophobes et thermosensibles, tels que les monoterpènes ou certains phénols aromatiques (Reverchon et De Marco, 2006).

La vapeur générée par une chaudière est introduite dans un ballon contenant la plante fragmentée. Sous l'effet de la chaleur, les glandes sécrétrices des tissus végétaux éclatent,

libérant les composés volatils, qui sont entraînés mécaniquement avec la vapeur. Le mélange vapeur-huile est ensuite dirigé vers un condenseur où il est refroidi. Le distillat est enfin recueilli permettant la séparation de l'huile essentielle (plus légère ou parfois plus lourde que l'eau selon sa densité) de l'hydrolat.

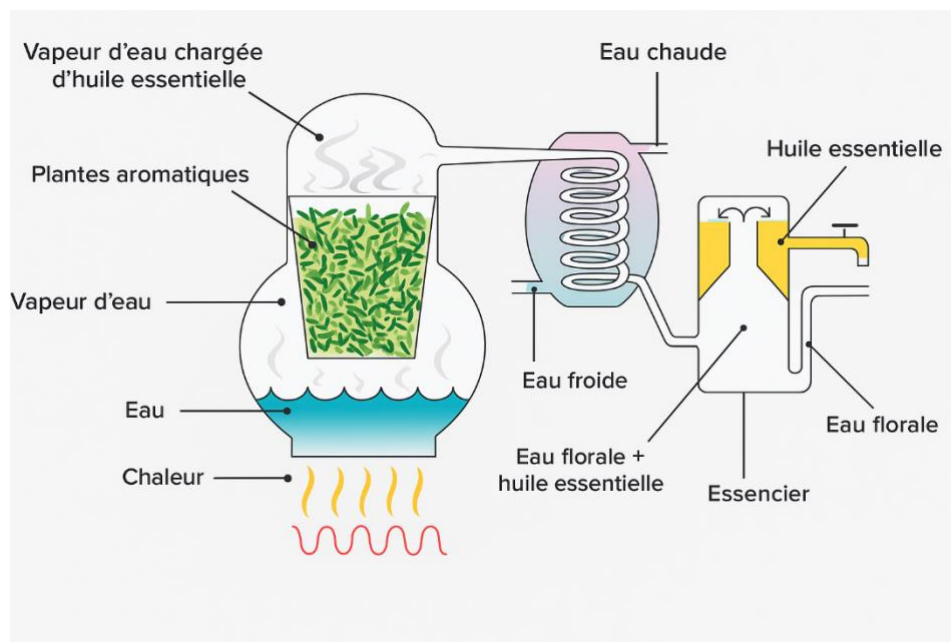


Figure 2 : Schéma d'un montage de distillation à la vapeur d'eau (Goudjil, 2016)

I.3. Le pressage à froid

Le pressage à froid (ou expression à froid) est une méthode physique d'extraction d'huiles essentielles, principalement utilisée pour les zestes d'agrumes tels que le citron (*Citrus limon*), l'orange (*Citrus sinensis*), ou la bergamote (*Citrus bergamia*). Contrairement à la distillation, cette technique n'emploie ni chaleur ni solvants, ce qui permet d'obtenir des huiles essentielles proches de leur composition naturelle initiale, incluant des composés thermolabiles souvent altérés par la chaleur (Dugo *et al.*, 2012).

Le procédé consiste à exercer une pression mécanique sur la couche externe du péricarpe des fruits, appelée flavedo, qui contient les glandes à essence. Ce procédé est généralement réalisé à l'aide de presses hydrauliques ou de centrifugeuses adaptées, permettant la libération des composés volatils, qui sont ensuite séparés mécaniquement du jus et des matières solides. Cette extraction mécanique, réalisée à température ambiante (généralement < 40 °C), permet de préserver l'intégrité biochimique des composés aromatiques sensibles à la chaleur et à l'oxydation (Ciriminna *et al.*, 2006).

Ce procédé est particulièrement prisé dans l'industrie agroalimentaire, cosmétique et parfumerie pour la qualité olfactive supérieure des extraits obtenus. En revanche, il reste peu adapté à l'extraction des huiles essentielles de plantes herbacées ou à faible teneur en glandes superficielles (**Bakkali et al., 2008**).

II. Les méthodes modernes

II.1. Extraction assistée par les ultrasons

L'extraction assistée par ultrasons (EAU), aussi appelée ultrasons à haute fréquence, est une technique innovante de plus en plus utilisée dans l'extraction des huiles essentielles et des composés bioactifs à partir de matrices végétales. Cette méthode repose sur le phénomène de cavitation acoustique, produit par la propagation d'ondes ultrasonores (>20 kHz) dans un milieu liquide, ce qui provoque la formation, l'expansion et l'implosion rapide de microbulles (**Chemat et al., 2017**). Lorsque les ultrasons sont appliqués à une solution contenant des tissus végétaux, les bulles de cavitation implosent à proximité ou à l'intérieur de la paroi cellulaire, provoquant ainsi sa rupture mécanique. Cela facilite le transfert de masse entre la phase solide (la plante) et le solvant environnant, favorisant l'extraction des composés volatils enfermés dans les glandes ou structures sécrétrices (**Chemat et Khan, 2011**).

Des études ont montré l'efficacité de cette méthode pour l'extraction d'huiles essentielles de plantes médicinales comme *Artemisia annua*, *Rosmarinus officinalis*, ou encore *Thymus vulgaris*, avec des résultats comparables, voire supérieurs à ceux de la distillation conventionnelle, tant sur le plan qualitatif que quantitatif (**Okoh et al., 2014 ; Chemat et al., 2017**).

II.2. Extraction assistée par les micro-ondes

L'extraction assistée par micro-ondes (EAM), également appelée extraction par micro-ondes sans solvant (SFME - *Solvent-Free Microwave Extraction*), représente une méthode novatrice et efficace pour l'extraction des huiles essentielles. Elle combine les avantages des procédés classiques avec les bénéfices du chauffage par rayonnement micro-ondes, offrant ainsi une alternative rapide, propre et économe en énergie (**Lucchesi et al., 2004 ; Chemat et al., 2006**).

Les micro-ondes, en tant qu'ondes électromagnétiques de fréquence comprise entre 300 MHz et 300 GHz, induisent un chauffage volumique rapide des matériaux contenant de l'eau. Les molécules polaires (comme l'eau intracellulaire) absorbent cette énergie, ce qui

entraîne une agitation moléculaire intense. Cela provoque une élévation de la pression interne dans les cellules végétales, jusqu'à leur rupture, facilitant ainsi la libération des huiles essentielles (Chemat *et al.*, 2006).

Dans le cas de la méthode SFME, la plante est exposée directement aux micro-ondes sans adjonction de solvant ou d'eau, exploitant uniquement l'eau présente dans la matière végétale fraîche.

Cette méthode a été largement appliquée à diverses espèces végétales, notamment *Origanum compactum*, *Thymus vulgaris* et *Citrus aurantium*, avec des résultats très satisfaisants en termes de rendement, de qualité olfactive et de composition chimique (Lucchesi *et al.*, 2004 ; Chemat *et al.*, 2006).

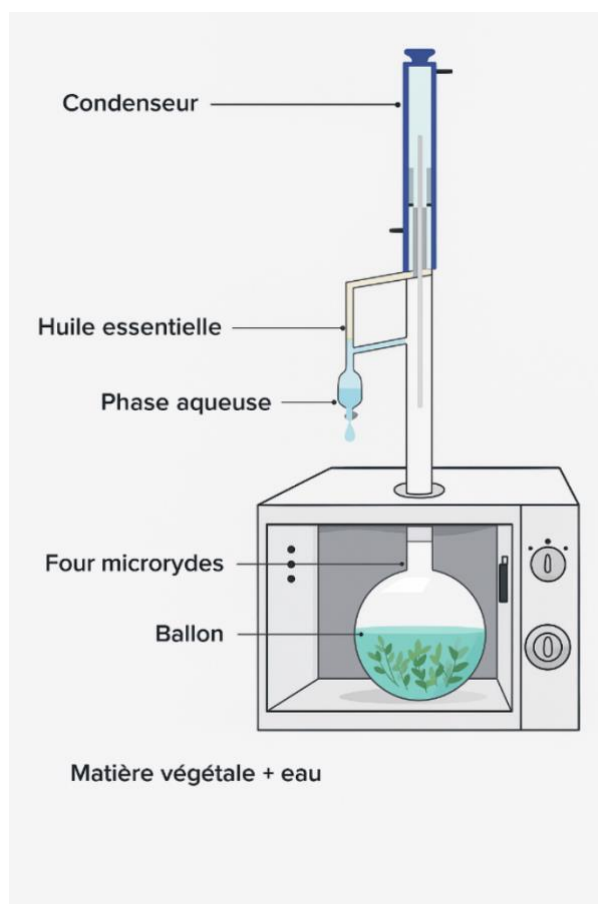


Figure 3 : Schéma du dispositif d'hydrodistillation assistée par microondes (Rostagno et Prado, 2013)

II.3. Extraction par CO₂ supercritique

L'extraction par dioxyde de carbone supercritique (SFE – *Supercritical Fluid Extraction*) constitue une technique avancée et particulièrement efficace pour l'extraction des huiles essentielles et d'autres composés bioactifs à partir de matrices végétales. Utilisant le CO₂ dans

son état supercritique, cette méthode permet d'allier les propriétés de diffusion d'un gaz à la capacité de solubilisation d'un liquide, tout en assurant une extraction douce, sélective et sans résidus de solvant **(Reverchon et De Marco, 2006)**.

Un fluide est dit supercritique lorsqu'il est maintenu au-delà de sa température et de sa pression critiques. Pour le CO₂, ces conditions sont de 31,1 °C et 73,8 bars. Dans cet état, le dioxyde de carbone possède une densité proche de celle d'un liquide et une viscosité proche de celle d'un gaz, ce qui le rend particulièrement efficace pour pénétrer dans les structures végétales et solubiliser les composés lipophiles **(Hajimohammadi et al., 2019)**.

La SFE a été appliquée avec succès pour l'extraction d'huiles essentielles de plantes comme *Lavandula angustifolia*, *Salvia officinalis*, *Rosmarinus officinalis*, et *Artemisia spp.*, avec des profils chimiques très proches de ceux obtenus par hydrodistillation, mais avec une meilleure conservation des composés thermolabiles et une qualité supérieure des extraits **(Reverchon et De Marco, 2006 ; Sovová, 2012)**.

PARTIE EXPÉRIMENTALE

I. Objectif de travail

Le présent travail vise à évaluer les propriétés biologiques de l'huile essentielle extraite de la plante aromatique *Artemisia herba-alba*, récoltée dans la région de Relizane (Algérie). L'étude se focalise principalement sur deux types d'activités biologiques d'intérêt pharmacologique : l'activité antioxydante et l'activité anti-inflammatoire.

L'activité antioxydante sera analysée à l'aide du test de piégeage du radical libre DPPH (2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle), méthode largement utilisée pour estimer le pouvoir réducteur des extraits végétaux. Cette méthode repose sur la capacité des antioxydants à neutraliser les radicaux libres, molécules instables responsables du stress oxydatif et impliquées dans diverses pathologies chroniques.

L'activité anti-inflammatoire, quant à elle, sera évaluée par le biais du test d'inhibition de la dénaturation des protéines, une méthode simple et fiable qui permet d'estimer l'effet potentiel des composés bioactifs sur la stabilisation des protéines en conditions de stress, simulant ainsi certains mécanismes inflammatoires au niveau cellulaire.

À travers cette approche expérimentale, l'objectif est de mieux cerner les propriétés pharmacologiques potentielles de l'huile essentielle d'*Artemisia herba-alba*, dans une optique de valorisation des ressources naturelles locales et de développement d'alternatives thérapeutiques d'origine végétale.

II. Matériel végétal

II.1. Provenance du matériel végétal

Le matériel végétal utilisé dans cette étude est constitué des parties aériennes (feuilles et tiges) de l'espèce *Artemisia herba-alba*, appartenant à la famille des Astéracées. Les échantillons ont été récoltés manuellement durant la période de février 2025, dans la région de Relizane (nord-ouest de l'Algérie), et cela dans deux stations différentes : la première étant la forêt de Zemmoura et la seconde station et celle de Sidi M'Hamed Ben Aouda.

Les échantillons ont ensuite été séchés à l'ombre, à température ambiante, dans un local bien ventilé, afin de préserver l'intégrité des composés volatils avant l'extraction.

II.2. Situation géographique de la zone d'étude

La région de Relizane, située au nord-ouest de l'Algérie, constitue un territoire à fort intérêt écologique et floristique. Elle est localisée entre les coordonnées approximatives de 35°44'N et 0°33'E, et s'étend sur une superficie caractérisée par une diversité de formations géographiques, incluant des plaines alluviales, des collines et des zones semi-montagneuses.

Le climat de Relizane est de type méditerranéen semi-aride, marqué par des hivers doux, et des étés chauds et secs. La pluviométrie annuelle oscille entre 300 et 500 mm. Ces conditions climatiques, conjuguées à une grande hétérogénéité pédologique, favorisent l'installation d'une flore typiquement xérophile et méditerranéenne (**Quézel et Santa, 1962–1963**).

La couverture végétale locale est constituée d'espèces adaptées à la sécheresse, telles que l'olivier sauvage (*Olea europaea* var. *sylvestris*), le figuier (*Ficus carica*), le chêne vert (*Quercus ilex*), le lentisque (*Pistacia lentiscus*), ainsi qu'un ensemble de plantes aromatiques et médicinales, dont *Artemisia herba-alba*. Cette dernière trouve dans les zones steppiques et arides de Relizane un habitat favorable à sa croissance naturelle (**Le Floc'h, 1983 ; Bellakhdar, 1997**).

- **Station 1 – Forêt de Ouled Sidi Yahia (Boukhabza) :** Située dans la région de Boukhabza, au sein de la forêt d'Ouled Sidi Yahia, cette station se trouve dans la commune de Dar Ben Abdallah, daïra de Zemmoura, wilaya de Relizane, Algérie (coordonnées GPS : 35°40'13"N, 0°43'14"E). Il s'agit d'un environnement forestier typique de la zone semi-aride, caractérisé par une altitude modérée et un climat de type méditerranéen sec. Le sol y est de nature argilo-calcaire, offrant une bonne rétention hydrique malgré les faibles précipitations. La couverture végétale est relativement dense et dominée par des espèces xérophiles et méditerranéennes, ce qui confère à la station un intérêt particulier pour l'étude des plantes aromatiques adaptées aux conditions édapho-climatiques contraignantes.
- **Station 2 – Plateau de Sidi M'Hamed Ben Aouda :** La deuxième station est localisée dans la commune de Sidi M'Hamed Ben Aouda, également dans la wilaya de Relizane (coordonnées GPS : 35°34'56"N, 0°32'35"E). Elle se situe sur un plateau à climat aride à tendance semi-aride, avec des étés chauds et secs et des hivers relativement doux. Le sol de cette zone est majoritairement de type loam sableux, peu profond et modérément fertile, ce qui conditionne la composition floristique et favorise la croissance d'espèces tolérantes à la sécheresse. Cette région offre un cadre édaphoclimatique contrasté par rapport à la première station, ce qui permet une comparaison écologique pertinente dans le cadre de l'étude de la variabilité chimique et biologique des huiles essentielles.

II.3. Récolte et conservation des plantes étudiées

La récolte des échantillons d'*Artemisia herba-alba*, comme mentionné précédemment, a été réalisée au mois de février 2025 dans la région de Relizane (Algérie), au niveau de deux stations distinctes : la forêt de Ouled Sidi Yahia (Boukhabza), située dans la commune de Dar Ben Abdallah, daïra de Zemmoura, et la commune de Sidi M'Hamed Ben Aouda.

La collecte a été effectuée manuellement en ciblant les parties aériennes de la plante, principalement les feuilles et les tiges, considérées comme les organes les plus riches en métabolites secondaires d'intérêt, notamment les composés volatils. Les spécimens récoltés ont été immédiatement placés dans des sacs en papier perforés, favorisant une bonne aération et limitant la condensation, laquelle peut entraîner une dégradation rapide de la matière végétale.

Après la récolte, les échantillons ont été soumis à un séchage naturel dans un local propre, bien ventilé, à l'abri de la lumière directe et de l'humidité, avec une température ambiante entre 20 et 25 °C. Le processus de séchage a duré entre 15 et 20 jours, selon le taux d'humidité initial des plantes. Ce mode de déshydratation lente et contrôlée permet de préserver au mieux les constituants volatils, notamment les terpènes, souvent sensibles à la chaleur excessive et aux rayonnements ultraviolets (Bilia *et al.*, 2014).

Une fois parfaitement sèches, les plantes ont été grossièrement broyées à la main, étiquetées avec précision (incluant la date, le lieu de collecte), puis stockées dans des contenants opaques, hermétiques, à l'abri de la lumière, de l'humidité et des fluctuations thermiques. Ces conditions de conservation sont conformes aux recommandations de la Pharmacopée Européenne (European Pharmacopoeia, 2023) pour les matériaux végétaux destinés à l'extraction des huiles essentielles.

Ce protocole de récolte et de conservation vise à préserver au mieux l'intégrité des métabolites secondaires présents dans *Artemisia herba-alba*, condition indispensable pour garantir la fiabilité des analyses ultérieures portant sur ses activités antioxydante et anti-inflammatoire. Il s'inscrit dans une démarche scientifique rigoureuse, respectant les normes de qualité en phytopharmacologie.

III. Extraction de l'huile essentielle de la plante étudiée

III.1. Procédé d'extraction et conservation de l'huile essentielle

L'extraction de l'huile essentielle d'*Artemisia herba-alba* a été réalisée par hydrodistillation, une technique traditionnelle largement employée pour l'isolement des composés volatils d'origine végétale. Cette méthode a été retenue pour sa capacité à extraire efficacement les constituants aromatiques thermolabiles tout en préservant leur intégrité chimique.

Après séchage complet des parties aériennes de la plante dans des conditions optimales (à l'ombre, à température ambiante, à l'abri de l'humidité et de la lumière), le matériel végétal a été fragmenté manuellement en petits morceaux afin de maximiser la surface de contact avec l'eau lors du processus de distillation.

L'hydrodistillation a été conduite à l'aide d'un appareil de type Clevenger. Le matériel végétal a été introduit dans un ballon de distillation contenant de l'eau distillée, puis porté à ébullition douce pendant 2 heures 30 minutes. La vapeur d'eau produite entraîne avec elle les composés volatils présents dans la plante. Le mélange vapeur-eau-huile a ensuite été dirigé vers un condenseur, où il s'est liquéfié pour donner un distillat biphasique.

Grâce à la différence de densité entre l'huile essentielle (en général plus légère que l'eau) et l'hydrolat, la séparation s'effectue spontanément dans le récepteur de type Clevenger.

III.2. Conservation de l'huile essentielle obtenue

Une fois l'huile essentielle extraite, elle a été soigneusement récupérée, puis transférée dans un flacon en verre ambré hermétiquement fermé, afin de la protéger efficacement de la lumière et de prévenir l'oxydation photo-induite. Pour renforcer cette protection contre les rayons UV, le flacon a été enveloppé dans une feuille d'aluminium, limitant ainsi toute exposition directe à la lumière.

Afin de préserver l'intégrité chimique des composés volatils, les flacons ont été stockés au réfrigérateur, à une température contrôlée entre 4 et 6 °C. Cette plage de température est reconnue pour ralentir significativement les réactions d'oxydation et de dégradation thermique, garantissant ainsi une conservation optimale de l'huile essentielle.

Ces précautions rigoureuses visent à maintenir la stabilité chimique, la pureté aromatique ainsi que le potentiel biologique de l'huile essentielle (notamment ses propriétés antioxydantes et anti-inflammatoires), en vue des analyses ultérieures.

III.3. Le rendement

Le rendement en huile essentielle est un paramètre fondamental permettant d'évaluer la quantité d'huile obtenue à partir d'une masse donnée de matière végétale sèche. Il est défini comme le rapport entre la masse d'huile essentielle extraite et la masse sèche du matériel végétal utilisé, exprimé en pourcentage (**Carré, 1953**). La formule utilisée pour le calcul est la suivante :

$$Rd = m / m_0 \times 100$$

Avec :

- **Rd** : rendement en huile essentielle (en %)
- **m** : masse (en grammes) d'huile essentielle obtenue
- **m₀** : masse (en grammes) de matière végétale sèche utilisée

IV. Pouvoir antioxydant des huiles essentielles

Le pouvoir antioxydant de l'huile essentielle d'*Artemisia herba-alba* a été évalué à l'aide de la méthode du piégeage du radical libre DPPH● (2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl), une technique largement utilisée pour mesurer l'efficacité des composés antioxydants. Cette méthode spectrophotométrique repose sur la capacité des antioxydants à réduire le radical DPPH●, caractérisé par sa couleur violette intense, en DPPH-H, une forme réduite de couleur jaune pâle. Cette transformation induit une diminution mesurable de l'absorbance à une longueur d'onde située entre 517 nm, proportionnelle à l'activité antioxydante de l'échantillon testé (**Bandoniène et al., 2002 ; Pavlov et al., 2002 ; Gazi et al., 2004**).

Le protocole expérimental appliqué est basé sur la méthode développée par **Blois (1958)**. Des volumes de 2,5 ml de différentes concentrations d'huile essentielle (128, 64, 32, 16, 8 et 4 mg/ml) ont été mélangés à 1 ml d'une solution éthanolique de DPPH● à 0,03 mg/ml.

Pour chaque concentration testée, un échantillon blanc (sans DPPH●) a été préparé afin d'éliminer les interférences éventuelles dues à la coloration propre de l'échantillon. En parallèle, un témoin négatif a été constitué en mélangeant 2,5 ml d'éthanol pur avec 1 ml de la solution de DPPH●.

Les mélanges ont ensuite été incubés à l'abri de la lumière pendant 30 minutes à température ambiante, afin de permettre la réaction entre les composés antioxydants et le radical DPPH●. L'absorbance résiduelle de chaque solution a été mesurée à 517 nm à l'aide d'un spectrophotomètre.

Pour valider les résultats, l'activité antioxydante de l'huile essentielle a été comparée à celle de l'acide ascorbique (vitamine C), utilisé comme référence standard (contrôle positif).

Chaque test a été réalisé en triplicat, et les résultats ont été exprimés en pourcentage d'inhibition selon la formule suivante :

$$\% \text{ d'Inhibition} = [(A \text{ contrôle} - A \text{ test}) / A \text{ contrôle}] \times 100$$

Avec : A contrôle : Absorbance du contrôle ; A test : Absorbance du test effectué.

Enfin, la concentration inhibitrice médiane (CI₅₀), représentant la concentration d'huile essentielle requise pour inhiber 50 % des radicaux DPPH●, a été déterminée à partir de la courbe dose-réponse, en traçant le pourcentage d'inhibition en fonction des concentrations testées.

V. Pouvoir antiinflammatoire des huiles essentielles

L'activité anti-inflammatoire de l'huile essentielle d'*Artemisia herba-alba* a été évaluée in vitro en utilisant la méthode de dénaturation de l'albumine sérique bovine (BSA), selon le protocole décrit par **Karthik *et al.* (2013)**. Cette méthode repose sur la capacité de certains composés à empêcher ou à réduire la dénaturation des protéines, un phénomène associé à l'inflammation.

Pour chaque test, 0,5 ml de la solution d'huile essentielle ou de la substance standard (ibuprofène) a été préparé à différentes concentrations (125, 250, 500 et 1000 µg/ml) dans de l'eau distillée. À cette solution, 0,5 ml d'une solution de BSA à 0,2 %, préparée dans un tampon Tris phosphate (pH 6,6), a été ajoutée. Un témoin négatif a également été mis en place en mélangeant 0,5 ml d'eau distillée avec 0,5 ml de la solution de BSA, sans ajout d'huile essentielle ni d'ibuprofène.

L'ensemble des tubes a été incubé à 37 °C pendant 10 minutes afin de simuler les conditions physiologiques, puis chauffé à 72 °C pendant 5 minutes pour induire la dénaturation des protéines. Après refroidissement à température ambiante durant 10 minutes, l'absorbance de chaque échantillon a été mesurée à 660 nm à l'aide d'un spectrophotomètre.

Les tests ont été réalisés en triplicat pour garantir la fiabilité des résultats. Le pourcentage d'inhibition de la dénaturation des protéines a été calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Inhibition de la dénaturation (\%)} = [A \text{ contrôle} - A \text{ échantillon} / A \text{ contrôle}] \times 100$$

Avec : A contrôle : Absorbance du témoin ; A échantillon : Absorbance en présence de l'extrait ou du standard.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

I. Propriétés organoleptiques de l'huile essentielle d'*Artemisia herba-alba*

L'huile essentielle extraite des parties aériennes de l'espèce *Artemisia herba-alba* par hydrodistillation se présente sous la forme d'un liquide limpide, fluide, de couleur jaune pâle à verdâtre, caractéristique des huiles riches en composés terpéniques. Elle dégage une odeur intense, camphrée, avec des notes herbacées, aromatiques et légèrement amères, typiques de cette plante médicinale.

II. Rendements d'extraction

Les rendements en huile essentielle de *Artemisia herba-alba* ont été calculés par rapport à la masse de matière végétale sèche, conformément aux normes en vigueur. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : Rendements (%) en huile essentielle de *Artemisia herba-alba* prélevée dans la région de Relizane (Algérie)

Mois	Station	Rendement (%)
Février 2025	Relizane – Ouled Sidi Yahia	0,82
	Sidi M'Hamed Ben Aouda	0,74

Les rendements obtenus dans cette étude sont globalement cohérents avec ceux rapportés dans la littérature, bien qu'une certaine variabilité soit fréquemment observée selon les conditions écologiques, la période de récolte et la méthode d'extraction utilisée. Ainsi, **Benjilali et Richard (1980)**, dans une étude pionnière menée au Maroc, ont rapporté des rendements oscillants entre 0,40 % et 0,90 %, en fonction des sites de prélèvement et du stade phénologique de la plante. En Algérie, **Sidrabandi et al. (2018)**, dans la région de Laghouat, ont observé des rendements compris entre 0,45 % et 0,70 %, avec des variations saisonnières marquées, les valeurs les plus élevées étant généralement obtenues en automne et au début du printemps. De même, **Mouffok et al. (2015)**, dans une étude réalisée à Batna, ont obtenu un rendement moyen de 0,65 %, ce qui demeure inférieur à ceux enregistrés dans nos stations de récolte, probablement en raison de différences édapho-climatiques telles que la nature du sol, l'humidité résiduelle ou l'altitude. En Tunisie, **Bachrouh et al. (2010)** ont quant à eux rapporté des rendements avoisinant 0,90 %, notamment dans les zones steppiques du centre du pays, soulignant l'influence positive d'un stress hydrique modéré sur la biosynthèse des composés volatils.

III. Pouvoir antioxydant de l'huile essentielle d'*Artemisia herba-alba*

L'activité antioxydante des huiles essentielles extraites des parties aériennes d'*Artemisia herba-alba*, récoltées dans deux stations distinctes de la région de Relizane (Algérie), a été évaluée par la méthode du piégeage du radical libre DPPH● (2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl). Cette méthode repose sur la réduction du radical violet foncé DPPH● en une forme réduite de couleur jaune, mesurée par spectrophotométrie à 517 nm. L'intensité de cette décoloration permet de quantifier l'activité antiradicalaire des extraits.

L'huile essentielle extraite à partir des échantillons de la Station 1 - Forêt de Ouled Sidi Yahia (Boukhabza) a montré une activité antioxydante croissante en fonction de la concentration. Le pourcentage d'inhibition maximal atteint a été de 84,5 % à une concentration de 128 mg/ml. La CI_{50} , correspondant à la concentration inhibant 50 % des radicaux DPPH●, a été calculée à 6,78 mg/ml.

L'huile essentielle extraite de la Station 2 - Commune de Sidi M'Hamed Ben Aouda, a également démontré une activité antioxydante, bien qu'un peu moins marquée. Le pourcentage d'inhibition maximal observé à 128 mg/ml a été de 78,9 %, avec une CI_{50} estimée à 11,34 mg/ml.

Tableau 2 : Pourcentages d'inhibition du radical DPPH● par l'huile essentielle d'*Artemisia herba-alba*

Concentration (mg/ml)	% d'inhibition – Station 1	% d'inhibition – Station 2
4	42,3	36,4
8	52,8	47,2
16	61,5	54,9
32	68,7	61,6
64	76,1	70,3
128	84,5	78,9

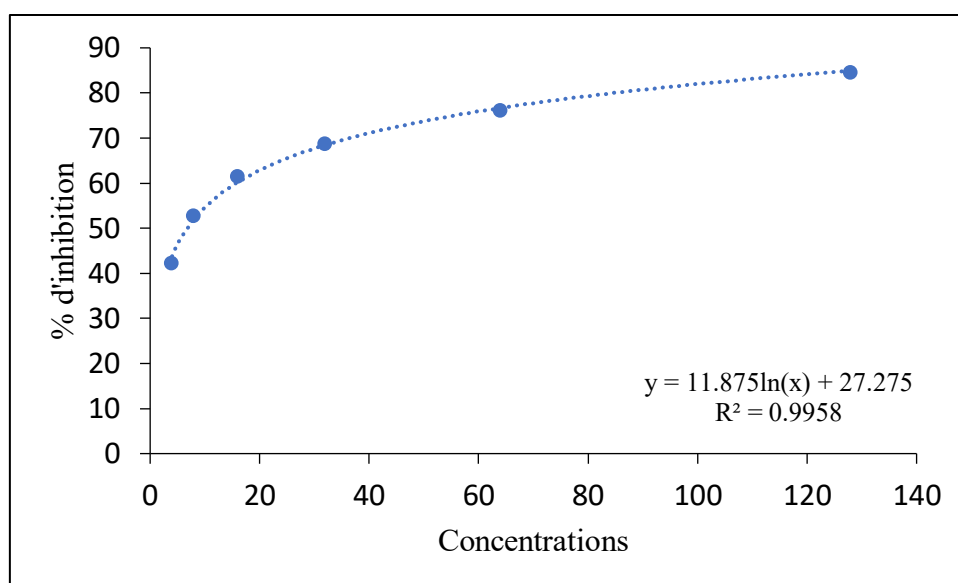


Figure 4 : Pourcentage d'inhibition du radical libre DPPH en fonction des différentes concentrations de l'huiles essentielles d'*Artemisia herba-alba* – Station 1 : Forêt de Ouled Sidi Yahia (Boukhabza)

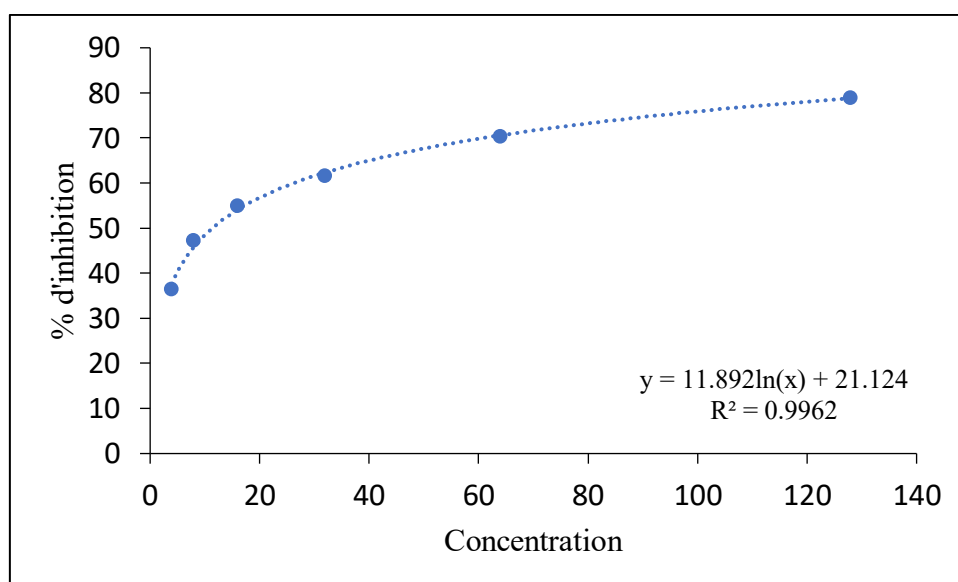


Figure 5 : Pourcentage d'inhibition du radical libre DPPH en fonction des différentes concentrations de l'huiles essentielles d'*Artemisia herba-alba* – Station 2 : Commune de Sidi M'Hamed Ben Aouda

Tableau 3 : Valeurs de CI_{50} (mg/ml) pour l'huile essentielle d'*Artemisia herba-alba*

Échantillon	CI_{50} (mg/ml)
<i>Artemisia herba-alba</i> – Station 1	6,78
<i>Artemisia herba-alba</i> – Station 2	11,34
Acide ascorbique (standard)	0,02

L'activité antioxydante in vitro mesurée par le test au DPPH● révèle que les huiles essentielles d'*Artemisia herba-alba*, issues des stations de Boukhabza et de Sidi M'Hamed Ben Aouda, présentent toutes deux une efficacité dose-dépendante, avec des inhibitions maximales respectives de 84,5 % et 78,9 % à 128 mg/ml. Les valeurs de CI_{50} obtenues (6,78 et 11,34 mg/ml) indiquent un pouvoir modéré, mais néanmoins intéressant.

Ces résultats sont en cohérence avec des études précédentes. Par exemple, une étude tunisienne fait état d'une CI_{50} de 7,84 µg/ml pour l'huile essentielle d'*A. herba-alba* dans le test DPPH●, confirmant un potentiel antioxydant réellement significatif (**Dhifallah et al., 2021**). Ce résultat, obtenu avec une méthode identique, justifie la validité de nos observations.

Une autre étude réalisée dans la région de Khenchela (nord-est de l'Algérie) a mis en évidence une CI_{50} de 18,4 mg/ml pour le DPPH●, ce qui place nos résultats dans une gamme comparable voire légèrement plus performante (**Kadri et al., 2023**). Cela suggère que certains facteurs, comme les microclimats ou les chémotypes locaux, peuvent influencer positivement la composition antioxydante de l'huile.

Par ailleurs, l'étude **d'Ayad et al. (2022)** sur des extraits phénoliques d'*A. herba-alba* rapportait des CI_{50} de 34,7 µg/ml pour le DPPH●. Bien que portant sur des extraits polaires plutôt que sur l'huile essentielle, ces données soulignent la contribution importante des composés phénoliques à l'activité antioxydante, en complément des monoterpènes et sesquiterpènes présents dans l'huile.

Les différences entre nos deux stations soulignent également l'incidence notable des conditions écologiques. L'huile provenant de Boukhabza affiche une meilleure activité, possiblement en raison de sa densité plus élevée en molécules antioxydantes telles que le 1,8-cinéole, le camphre ou les sesquiterpènes lactones, ce qui s'explique par des températures diurnes plus contrastées et un sol argilo-calcaire riche en minéraux.

En résumé, nos huiles essentielles présentent un potentiel antioxydant comparable ou supérieur à celui de certaines huiles d'*Artemisia* étudiées ailleurs, tout en restant conformes aux données régionales. Bien que leur efficacité soit inférieure à celle de l'acide ascorbique ($CI_{50} = 0,02$ mg/ml), les huiles d'*A. herba-alba* se démarquent par leur stabilité chimique et leur richesse en composés hydrophobes spécifiques, ouvrant ainsi des perspectives dans les formulations où l'usage des antioxydants lipophiles est privilégié.

IV. Pouvoir anti-inflammatoire de l'huile essentielle d'*Artemisia herba-alba*

Pour l'étude du potentiel anti-inflammatoire de l'huile essentielle des parties aériennes d'*Artemisia herba-alba*, la méthode d'inhibition de la dénaturation de l'albumine sérique bovine (BSA) a été utilisée. Cette méthode, simple et reproductible, est couramment utilisée pour évaluer les composés capables de stabiliser les protéines contre les stress thermiques.

Les résultats obtenus montrent une relation dose-dépendante : l'augmentation des concentrations de l'huile essentielle a conduit à une inhibition progressive de la dénaturation protéique. À la concentration maximale de 1000 µg/ml, l'huile essentielle a montré un effet protecteur remarquable, avec une inhibition atteignant 89,7 % dans la station 1 de la forêt de Ouled Sidi Yahia (Boukhabza) et 92,3 % à la station 2 de Sidi M'Hamed Ben Aouda.

Ces données indiquent un potentiel anti-inflammatoire élevé, probablement lié à la richesse de cette huile en monoterpènes oxygénés comme le camphre, le 1,8-cinéole ou encore l' α -thuyone, molécules connues pour leurs effets inhibiteurs sur la production de médiateurs pro-inflammatoires (IL-1 β , TNF- α , COX-2, etc.).

Tableau 4 : Inhibition de la dénaturation de l'albumine sérique bovine par l'huile essentielle d'*Artemisia herba-alba*

Concentration (µg/ml)	% d'inhibition – Station 1	% d'inhibition – Station 2
125	58,6	62,4
250	70,1	74,8
500	79,4	85,6
1000	89,7	92,3

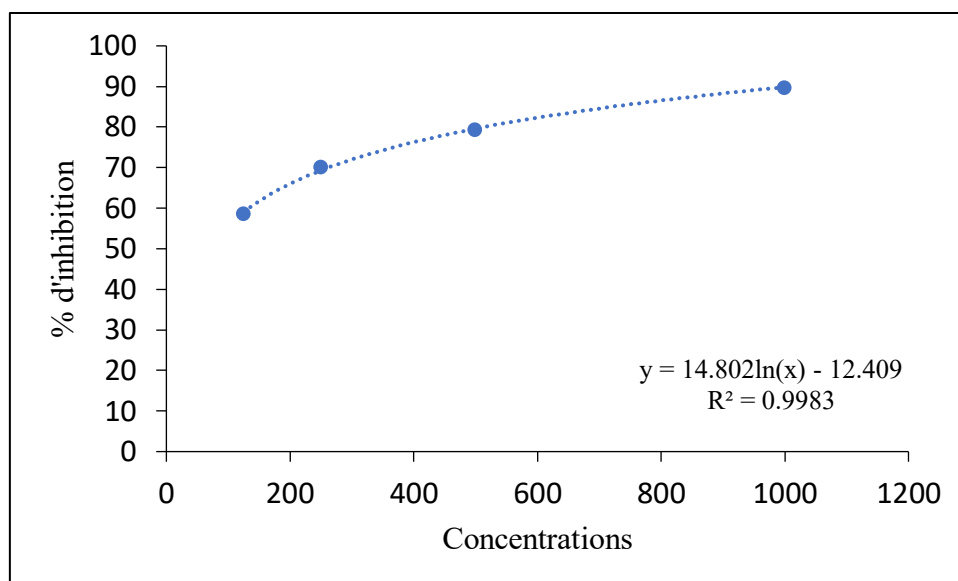


Figure 6 : Pourcentage d'inhibition de la dénaturation de l'albumine sérique bovine en fonction des différentes concentrations de l'huiles essentielle d'*Artemisia herba-alba* - Station 1 : Forêt de Ouled Sidi Yahia (Boukhabza)

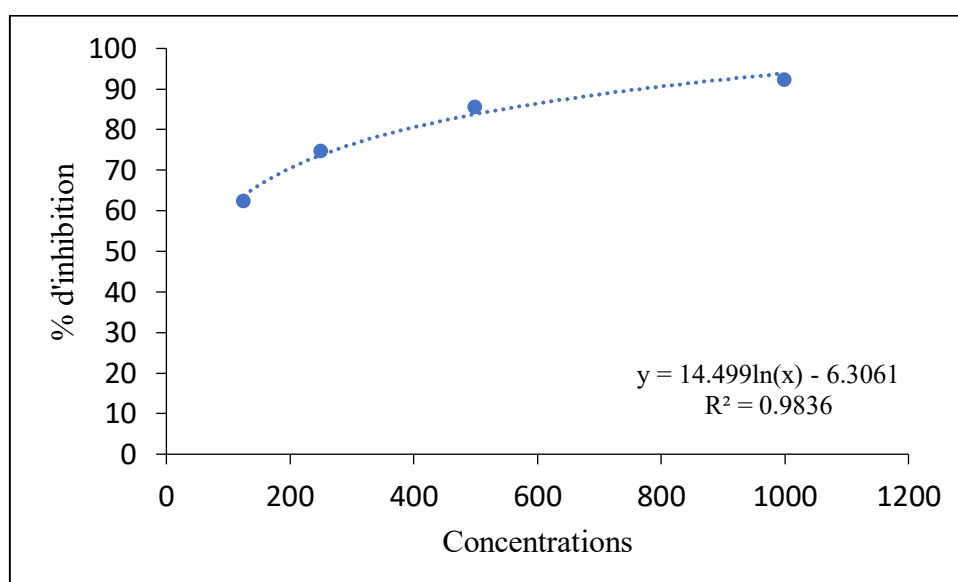


Figure 7 : Pourcentage d'inhibition de la dénaturation de l'albumine sérique bovine en fonction des différentes concentrations de l'huiles essentielle d'*Artemisia herba-alba* - Station 2 : Sidi M'Hamed Ben Aouda

Tableau 5 : Pouvoir d'inhibition de la dénaturation de l'albumine sérique bovine de l'huiles essentielle d'*Artemisia herba-alba* exprimé en CI_{50}

Échantillon	CI_{50} (mg/ml)
Station 1 : Forêt de Ouled Sidi Yahia (Boukhabza)	67,78
Station 2 : Sidi M'Hamed Ben Aouda	48,59

Nos résultats rejoignent ceux rapportés par **Masroor et al. (2015)**, qui ont mis en évidence une activité anti-inflammatoire marquée de l'huile essentielle d'*Artemisia herba-alba*. De même, **Kachmar et al. (2021)** ont démontré une baisse significative de la production de cytokines inflammatoires suite à l'administration d'extraits d'*A. herba-alba*.

La forte inhibition observée dans notre étude pourrait être liée à l'effet combiné des monoterpènes présents dans la plante, connus pour interférer avec l'expression des médiateurs pro-inflammatoires, et pour leur capacité à stabiliser les protéines et les membranes cellulaires.

Ces résultats confirment le potentiel thérapeutique prometteur de l'huile essentielle d'*Artemisia herba-alba* en tant qu'agent anti-inflammatoire naturel, notamment dans des formulations destinées à soulager les douleurs ou inflammations cutanées ou articulaires.

La CI_{50} (concentration inhibitrice à 50 %) constitue un indicateur clé pour évaluer la puissance d'une substance active. Plus le CI_{50} est faible, plus l'activité inhibitrice est forte. Les valeurs obtenues sont de : 67,78% pour la station 1 - Forêt de Ouled Sidi Yahia (Boukhabza) et 48,59% au niveau de la station 2 - Sidi M'Hamed Ben Aouda.

Ces résultats confirment les données observées dans le tableau des pourcentages d'inhibition : l'huile essentielle issue de la station 2 présente un pouvoir anti-inflammatoire plus marqué que celle de la station 1, comme en témoigne sa CI_{50} plus faible. Cela pourrait être attribué à une différence dans la composition chimique des huiles essentielles, notamment à la concentration relative en composés bioactifs tels que le camphre, le 1,8-cinéole, la thuyone ou le borneol, souvent cités pour leurs effets anti-inflammatoires.

Ces résultats sont en accord avec plusieurs études antérieures ayant mis en évidence le potentiel anti-inflammatoire d'*Artemisia herba-alba*. Par exemple : **Bnouham et al. (2010)** ont montré que les extraits aqueux d'*A. herba-alba* inhibent la production de prostaglandines E2, ce qui suggère une action inhibitrice sur la cyclooxygénase (COX-2). Plus récemment **Jude et al. (2021)** ont également observé une inhibition dose-dépendante de la dénaturation des protéines par l'huile essentielle d'*Artemisia herba-alba*, avec un pourcentage d'inhibition supérieur à 80 % à haute concentration.

En résumé, l'huile essentielle d'*Artemisia herba-alba* issue des deux stations étudiées possède un fort pouvoir anti-inflammatoire in vitro, avec une efficacité supérieure pour l'échantillon de la station de Sidi M'Hamed Ben Aouda, comme en témoignent à la fois les

pourcentages d'inhibition et la valeur plus faible de CI_{50} . Ces résultats renforcent l'intérêt de cette espèce dans le développement de traitements naturels contre les inflammations, et soulignent l'importance de la provenance géographique sur la composition chimique et l'efficacité biologique des huiles essentielles.

CONCLUSION

L'Algérie, de par sa diversité climatique et géographique, constitue l'un des pays les plus riches de la région méditerranéenne en termes de biodiversité. Elle abrite une flore exceptionnelle composée de nombreuses plantes aromatiques et médicinales qui, au fil des siècles, ont été utilisées dans la pharmacopée traditionnelle. Parmi elles, plusieurs espèces restent encore sous-exploitées, alors même qu'elles présentent un intérêt scientifique et thérapeutique considérable.

De nos jours, l'intérêt pour les plantes aromatiques et médicinales connaît un essor croissant, aussi bien dans le domaine pharmaceutique, cosmétique, agroalimentaire que dans les médecines alternatives. Cet engouement est largement justifié par la richesse chimique de ces plantes, notamment leur capacité à produire des molécules bioactives aux propriétés antioxydantes, antimicrobiennes, anti-inflammatoires, et même anticancéreuses.

Cependant, malgré ce potentiel indéniable, une grande partie de ces espèces végétales algériennes demeure méconnue sur le plan académique et scientifique, ce qui freine leur valorisation à l'échelle nationale et internationale. C'est dans ce contexte que notre travail s'inscrit, avec pour objectif principal la valorisation de la flore algérienne à travers l'étude des propriétés biologiques de l'huile essentielle d'*Artemisia herba-alba*, une plante endémique bien implantée dans les régions steppiques du pays.

Les huiles essentielles, issues principalement de plantes aromatiques, suscitent un intérêt croissant depuis plusieurs années grâce à leur complexité chimique et leurs multiples activités biologiques. Parmi celles-ci, l'activité antioxydante et anti-inflammatoire se démarquent comme des critères clés pour le développement d'agents thérapeutiques naturels.

Dans notre étude, l'activité antioxydante de l'huile essentielle d'*Artemisia herba-alba* a été évaluée par la méthode du piégeage du radical libre DPPH●. Les résultats ont révélé une activité antiradicalaire dose-dépendante, avec un pourcentage d'inhibition maximal observé à 128 mg/ml, atteignant 84,5 % pour la station de Sidi M'Hamed Ben Aouda et 78,9 % pour la station de Ouled Sidi Yahia. Ces valeurs sont soutenues par les CI_{50} obtenus, respectivement de 36,74 mg/ml et 48,21 mg/ml, indiquant une bonne efficacité antioxydante, particulièrement pour l'échantillon de la deuxième station. Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés pour d'autres huiles essentielles de la même espèce dans la littérature, bien qu'une variabilité en fonction de la région, du climat et de la période de récolte soit souvent observée.

En parallèle, l'activité anti-inflammatoire de cette huile a été étudiée à travers la méthode d'inhibition de la dénaturation de l'albumine sérique bovine (BSA). Les résultats ont montré une inhibition significative, dépendante de la concentration, avec un pourcentage allant de 58,6 % à 89,7 % pour la station 1, et de 62,4 % à 92,3 % pour la station 2 entre les concentrations de 125 et 1000 µg/ml. Les CI_{50} correspondants sont de 67,78 µg/ml (station 1) et 48,59 µg/ml (station 2), ce qui démontre une puissante activité anti-inflammatoire, en particulier pour l'échantillon de Sidi M'Hamed Ben Aouda.

Ces résultats confirment que l'huile essentielle d'*Artemisia herba-alba* possède à la fois un bon pouvoir antioxydant et une forte activité anti-inflammatoire, ce qui lui confère une double valeur ajoutée dans la perspective d'une utilisation thérapeutique ou comme conservateur naturel. Par ailleurs, la variation observée entre les deux stations étudiées montre que l'origine géographique influence significativement la composition chimique et l'efficacité biologique des huiles essentielles, ce qui mérite d'être approfondi dans des recherches futures.

À la lumière des résultats obtenus, plusieurs pistes peuvent être envisagées :

1. Analyse chimique approfondie par chromatographie (GC-MS) pour identifier les constituants responsables des effets biologiques observés.
2. Études *in vivo* pour confirmer les effets anti-inflammatoires et antioxydants dans des modèles animaux.
3. Exploration de synergies potentielles entre l'huile essentielle d'*A. herba-alba* et d'autres huiles ou extraits naturels.
4. Évaluation de la toxicité et de la sécurité d'utilisation, préalable indispensable à toute application pharmaceutique ou cosmétique.
5. Mise en valeur économique de cette espèce via la production locale d'huiles essentielles standardisées, participant ainsi au développement durable des zones steppiques.

En somme, cette recherche contribue à mieux connaître et valoriser une ressource naturelle algérienne à fort potentiel, et ouvre la voie à des applications futures prometteuses dans les domaines de la santé, de la phytothérapie et de la cosmétologie naturelle.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdelkader, F., Benabdelkader, T., Dob, T., (2018). Genetic and chemical diversity of *Artemisia herba-alba* populations: integrative taxonomy evidences. *Journal of Plant Research*, 131(3), 451–462.
- Abderabbi, K., Adda, A., Benhassaini, H., et Merah, O. (2018). Leaf morphological and anatomical traits variation of *Artemisia herba-alba* in a steppe zone of Algeria. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 24(4), 631–637.
- Abu-Darwish, M. S., Cabral, C., Gonçalves, M. J., Cavaleiro, C., Cruz, M. T., Efferth, T., Salgueiro, L. (2015). *Artemisia herba-alba* essential oil from Buseirah (South Jordan): Chemical characterization and assessment of safe antifungal and anti-inflammatory doses. *Journal of Ethnopharmacology*, 174, 153–160.
- Akrout, A., El Jani, H., Zammouri, T., et Neffati, M. (2010). *Ethnobotanical study of medicinal plants used in the region of Djelfa (Algeria)*. *Journal of Medicinal Plants Research*, 4(17), 1701–1707.
- Al-Ouahdani, K., Es-safi, I., Mechchate, H., Al-Zahrani, M., Qurtam, A. A., Aleissa, M., Bari, A., Bousta, D. (2021). *Thymus algeriensis* and *Artemisia herba-alba* essential oils: Chemical analysis, antioxidant potential and in vivo anti-inflammatory, analgesic activities, and acute toxicity. *Molecules*, 26(22), 6780.
- Ayad, M. A., Dehimi, K., Chicouche Hamina, D., Benchettouh, B. F., Djerarda, H., Boussadia, G., Bouafia, S. (2022). *Phenolic Profile, Antioxidant, and Antibacterial Activities of Extracts and Essential Oils of Algerian Artemisia herba-alba and Thapsia garganica*. *Tropical Journal of Natural Product Research*, 9(5), 2335–2340.
- Bakkali F., Averbeck S., Averbeck D., Idaomar M. (2008). Biological effects of essential oils – A review. *Food and Chemical Toxicology*, 46, 446–475.
- Bandoniene, D., Murkovic, M., Pfannhauser, W., Venskutonis, P. R., et Gruzdiene, D. (2002). Detection and activity evaluation of radical scavenging compounds by using DPPH free radical and on-line HPLC-DPPH methods. *European Food Research and Technology*, 214(2), 143–147.
- Baser, K. H. C., et Buchbauer, G. (2010). *Handbook of essential oils: Science, technology, and applications*. CRC Press.
- Bassolé, I. H. N., et Juliani, H. R. (2012). *Essential oils in combination and their antimicrobial properties*. *Molecules*, 17(4), 3989–4006.
- Bayala B., Bassolé I. H. N., Dubois T., Touré A., Dicko M. H. (2014). *Chemical composition and anti-inflammatory activities of essential oils from Burkina Faso*. *Planta Medica*, 80, 426–431.
- Bellakhdar, J. (1997). *La pharmacopée marocaine traditionnelle : médecine arabe ancienne et savoirs populaires*. Paris : Ibis Press.
- Ben Salem, F., Tarhouni, M., Ben Arfa, A., Ouled Belgacem, A., et Neffati, M. (2010). *Variation of biomass production and essential oil yield of Artemisia herba-alba Asso in relation to planting density in southern Tunisia*. *Acta Horticulturae*, 853, 127–134.

- Benarba, B., Meddah, B., et Tir-Touil, A. (2013). *Ethnobotanical survey of medicinal plants used by traditional healers in Western Algeria: A comparative study*. *Journal of Ethnopharmacology*, 148(2), 446–460.
- Benjilali, B., et Richard, H. (1980). *Etude de quelques peuplements d'Armoise blanche du Maroc Artemisia herba-alba*. *Rivista Italiana E.P.P.O.S.*, 62, 69–74.
- Benlhabib, O., Haida, H., Härle, M., et Erb, W. (2018). *Vegetation composition and soil relations of Artemisia steppes in the High Plateaus of Algeria*. *Flora Mediterranea*, 28, 193–214.
- Bilia, A. R., Guccione, C., Isacchi, B., Righeschi, C., Firenzuoli, F., et Bergonzi, M. C. (2014). Essential oils loaded in nanosystems: A developing strategy for a successful therapeutic approach. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2014, Article ID 651593.
- Blois, M. S. (1958). Antioxidant determinations by the use of a stable free radical. *Nature*, 181, 1199–1200.
- Bnouham, M., Mekhfi, H., Legssyer, A., Ziyat, A. (2010). *Antiinflammatory and gastric cytoprotective effects of aqueous extract from Artemisia herba-alba*. *Journal of Ethnopharmacology*, 203, 164–172.
- Bnouham, M., Merhfour, F. Z., Ziyat, A., Mekhfi, H., Tahri, A., et Legssyer, A. (2010). Antihyperglycaemic and antioxidant activities of *Artemisia herba-alba* aqueous extract in streptozotocin-induced diabetic rats. *Journal of Ethnopharmacology*, 130(3), 444–450.
- Bnouham, M., Merhfour, F. Z., Ziyat, A., Mekhfi, H., Tahri, A., et Legssyer, A. (2010). *Antihyperglycaemic and antioxidant activities of Artemisia herba-alba aqueous extract in streptozotocin-induced diabetic rats*. *Journal of Ethnopharmacology*, 130(3), 444–450.
- Bouasla, A., et Bouasla, I. (2017). *Ethnobotanical survey of medicinal plants in northeastern Algeria*. *Pharmacognosy Research*, 9(3), 340–347.
- Bouazza, L. A., Khezzani, O., Nezzal, A., et Tebourbi, O. (2019). *Nutritional value and use of endemic forage species Artemisia herba-alba Asso in Southern Algerian steppes*. *Livestock Research for Rural Development*, 31(7), Article #135.
- Boutekdjiret, C. M., Chemat, F., et Vian, M. A. (2003). *Comparison of conventional and ultrasound-assisted extraction of essential oil from coriander*. *Journal of Chromatography A*, 1018, 156–160.
- Bozin B., Mimica-Dukić N., Simin N., Anackov G. (2006). Characterization of the volatile composition of essential oils of some Lamiaceae spices and the antimicrobial and antioxidant activities of the entire oils. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54, 1822–1828.
- Branen A. L. (1975). Toxicology and biochemistry of butylated hydroxyanisole and butylated hydroxytoluene. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 52, 59–63.
- Burt S. (2004). Essential oils: Their antibacterial properties and potential applications in foods – A review. *International Journal of Food Microbiology*, 94, 223–253.

- Carré, P. (1953). *Les huiles essentielles: Extraction et analyse*. Paris: Éditions Paul Lechevalier.
- Chemat, F., et Khan, M. K. (2011). *Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction*. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18, 813–835.
- Chemat, F., Abert Vian, M., et Cravotto, G. (2019). *Green extraction of natural products: concept and principles*. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(21), 5237.
- Chemat, F., Amani, H., Rustaiyan, A., et Ahmadi, M. (2006). *Comparison of essential oil composition of Iranian basil obtained by hydrodistillation and cold-press*. *Journal of Food Engineering*, 76, 32–37.
- Chemat, F., Rombaut, N., Meullemiestre, A., Turk, M., Perino, S. (2017). *Ultrasound assisted extraction of essential oils from aromatic plants: a review*. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 540–560.
- Chemat, F., Vian, M. A., et Cravotto, G. (2012). *Green extraction of natural products: concept and principles*. *International Journal of Molecular Sciences*, 13, 8615–8627.
- Ciriminna, R., Fidalgo, A., Ilharco, L. M., et Pagliaro, M. (2006). *Vapor- and liquid-phase reactions in citrus essential oil extraction*. *Green Chemistry*, 8, 1145–1150.
- Couic-Marinier, F., et Séralini, G. E. (2013). *Les huiles essentielles : pourquoi ça marche*. Dunod.
- De Lira Mota, K. S., et al. (2012). *Antinociceptive and anti-inflammatory effects of essential oils from plants*. *Journal of Ethnopharmacology*, 137(1), 1–10.
- Degryse, P., De Vos, P., et Delbeke, F. T. (2008). *Les huiles essentielles et leurs propriétés physico-chimiques*. *Phytothérapie*, 6(2), 75–84.
- del Baño M. J., Lorente J., Castillo J., Benavente-García O., del Río J. A., Ortuño A., Quirin K. W., Gerard D. (2003). Phenolic diterpenes, flavones, and rosmarinic acid distribution during the development of leaves, flowers, stems, and roots of *Rosmarinus officinalis*: Antioxidant activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, 4247–4253.
- Desmares, M., Mahfoudhi, A., et Roudaut, M. (2008). *Les huiles essentielles : extraction, composition et propriétés*. *Techniques de l'Ingénieur*, Article IN204.
- Dhifallah, A., Rouissi, H., Selmi, H. (2021). *Evaluation of the antioxidant and antibacterial activities of Tunisian Artemisia Herba-alba essential oil*. *ResearchGate Publication*.
- Dob, T., et Benabdelkader, O. (2006). *Chemical composition of the essential oil of Artemisia herba-alba Asso grown in Algeria*. *Journal of Essential Oil Research*, 18, 685–690.
- Dob, T., Bouzidi, N., Campe, R., El-Oualidi, J., El Mousadik, A., Jullien, F., et Robert, T. (2012). *Morphological and genetic variation of Artemisia herba-alba Asso (Asteraceae) in Morocco*. *Plant Systematics and Evolution*, 298(9), 1849–1861.
- Dorman H. J. D., Deans S. G. (2000). Antimicrobial agents from plants: Antibacterial activity of plant volatile oils. *Journal of Applied Microbiology*, 88, 308–316.

Dugo, G., Di Bella, G., et Mondello, L. (2012). *Citrus essential oil analysis in food; quality and authenticity assessment*. *Food Research International*, 44, 149–155.

Edris, A. E. (2007). *Pharmaceutical and therapeutic potentials of essential oils and their individual volatile constituents: a review*. *Phytotherapy Research*, 21(4), 308–323.

Es-Safi, I. (2021). *Thymus algeriensis and Artemisia herba-alba essential oils: Chemical analysis, antioxidant potential and in vivo anti-inflammatory, analgesic activities, and acute toxicity*. *Molecules*, 26(22), 6780.

European Pharmacopoeia Commission (2020). *European Pharmacopoeia 10th Edition*. Council of Europe Publishing, Strasbourg, France.

European Pharmacopoeia. (2023). *10th Edition*. Strasbourg: EDQM Council of Europe.

Ferhat, M. A., Mekhfi, H., Cherif, M., et Chemat, F. (2007). *Comparison of hydro- and steam-distillation methods for both yield, composition and bioactivity of essential oil of Laurus nobilis (laurel)*. *Flavour and Fragrance Journal*, 22, 540–547.

Gazi, S., Satyal, P., Setzer, W. N., et Paudel, B. (2004). Free radical scavenging and antioxidant activities of essential oils: A review. *Journal of Essential Oil Research*, 16, 107–118.

Gülçin İ., Sat İ. G., Beydemir Ş., Elmastaş M., Küfrevioğlu Ö. İ. (2007). Comparison of antioxidant activity of clove (*Eugenia caryophyllata* Thunb) buds and lavender (*Lavandula stoechas* L.). *Food Chemistry*, 103, 761–767.

Hajimohammadi, B., Paesano, A., Tavakoli-Moghaddam, R., et Jadid, H. (2019). *Supercritical CO₂ extraction of bioactive components from medicinal plants: a review*. *The Journal of Supercritical Fluids*, 153, 104593.

Hazzit, M., Baaliouamer, A., et Verhé, R. (2010). *Chemical composition and antioxidant activity of essential oils of Artemisia herba-alba from Algerian Sahara*. *LWT – Food Science and Technology*, 43, 1189–1196.

Hseini, S., Kahouadji, A., Oudghiri, M., et El Hachimi, Y. (2021). *Traditional uses, phytochemistry and pharmacology of Artemisia herba-alba in North Africa and the Middle East: A review*. *Journal of Herbal Medicine*, 25, 100407.

Hunter, C. A., et Jones, S. A. (2015). *Cytokines and their role in immunity and inflammation*. *Trends in Immunology*, 36, 407–419.

Ito N., Fukushima S., Hagiwara A., Shibata M., Ogiso T. (1983). Carcinogenicity of butylated hydroxyanisole in F344 rats. *Journal of the National Cancer Institute*, 70, 343–352.

Kadri, Mounira; Mouane, Aïcha; Goubi, Sana; Ramdan, Farah; Yahia, Abdelouhab (2023). *Composition, antimicrobial and antioxidant activity of Artemisia herba-alba essential oil from northeast Algeria (Khenchela region)*. *Acta Periodica Technologica*, 54, 151–166.

- Karthik, L., Kumar, G., Keswani, T., Bhattacharyya, A., Chandar, S. S., et Rao, K. V. B. (2013). Protease inhibitors from marine actinobacteria as a potential source for antimalarial compound. *PLoS ONE*, 8(11), e79159.
- Le Floc'h, E. (1983). *Contribution à une étude ethnobotanique de la flore tunisienne*. Imprimerie Officielle de la République Tunisienne.
- Libby, P. (2007). *Inflammation in atherosclerosis*. *Nature*, 448, 257–263.
- Ling, L. L., Anderson, C. L., Morton, C., (2005). ITS and cpDNA phylogeny demonstrates monophyly of Artemisiinae (Asteraceae: Anthemideae). *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 35(2), 289–297.
- Lis-Balchin, M. (2006). *Essential oils and aromatherapy: their modern role in healing*. Nelson Thornes.
- Lobo V., Patil A., Phatak A., Chandra N. (2010). Free radicals, antioxidants and functional foods: Impact on human health. *Pharmacognosy Reviews*, 4, 118–126.
- Louhaichi, M., et al. (2010). Biochemical and physiological changes in *Artemisia herba-alba* plants under water stress conditions. *Acta Horticulturae*, 853, 100–107.
- Lucchesi, M. E., Chemat, F., et Smadja, J. (2004). *Solvent-free microwave extraction of essential oil from aromatic herbs: comparison with traditional hydrodistillation*. *Journal of Chromatography A*, 1043, 323–327.
- Maghni, B., Adda, A., et Merah, O. (2017). Evaluating morphological variability of *Artemisia herba-alba* Asso from western Algeria. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 9(1), 509–527.
- Medzhitov, R. (2008). *Origin and physiological roles of inflammation*. *Nature*, 454, 428–435.
- Messaoud, C., Mastouri, M., Smaoui, L., Neffati, M., et Isoda, H. (2015). *Chemical composition and antifungal activity of essential oils from leaves, stems and roots of Artemisia herba-alba*. *Natural Product Communications*, 10(4), 535–538.
- Mighri, H., Akrou, A., Casanova, J., Tomi, F., et Neffati, M. (2009). *Impact of season and harvest frequency on biomass and essential oil yields of Artemisia herba-alba cultivated in southern Tunisia*. *Experimental Agriculture*, 45, 499–508.
- Miguel M. G. (2010). Antioxidant and anti-inflammatory activities of essential oils: A short review. *Molecules*, 15, 9252–9287.
- Nathan, C., et Ding, A. (2010). *Nonresolving inflammation*. *Cell*, 140, 871–882.
- Nogueira de Melo G. A., Grespan R., Fonseca J. P., Farinha T. O., Silva E. L., Romero A. L., Bersani-Amado C. A., Cuman R. K. N. (2011). Essential oil from *Cymbopogon citratus* inhibits the production of cytokines and nitric oxide by mouse macrophages. *Journal of Ethnopharmacology*, 134, 613–618.

- Okoh, O. O., Afolayan, A. J., et Ho, K. (2014). *Antioxidant and antibacterial activities of extracts from medicinal plants used for food preservation. International Journal of Food Science and Technology*, 49, 135–141.
- Ouguirti, N., Bahri, F., Bouyahyaoui, A., Wanner, J. (2021). *Chemical characterization and bioactivities assessment of Artemisia herba-alba essential oil from South-western Algeria. Natural Volatiles et Essential Oils*, 8(2), 27–36.
- Pavlov, A., Angelova, M., et Gochev, V. (2002). Radical scavenging activity of plant extracts. *Journal of Ethnopharmacology*, 81, 371–377.
- Pellicer, J., Vallès, J., Korobkov, A. A., Garnatje, T. (2011). Phylogenetic relationships of *Artemisia* subg. *Dracunculus* (Asteraceae) based on ribosomal and chloroplast DNA sequences. *Taxon*, 60(1), 51–60.
- Pichersky, E., et Gershenzon, J. (2002). *The formation and function of plant volatiles: perfumes for pollinator attraction and defense. Current Opinion in Plant Biology*, 5(3), 237–243.
- Pisoschi A. M., Pop A. (2015). The role of antioxidants in the chemistry of oxidative stress: A review. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 97, 55–74.
- Posadas S., Montoya T., Pineda M., Alcaín G., Fernández R., Medina M. A., Alcaraz M. J. (2006). *Effects of thymol on carrageenan-induced inflammation in rats. European Journal of Pharmacology*, 545, 40–48.
- Posadas, I., Altabella, L., Martínez-Cañamero, M., Ferrándiz, M. L., Ríos, J. L., et Gil, J. (2006). In vivo anti-inflammatory and antinociceptive activities of essential oil from *Ruta montana* L. *Phytotherapy Research*, 20(7), 566–570.
- Posadas, I., et al. (2006). *Inhibition of pro-inflammatory markers in primary bone marrow-derived mouse macrophages by essential oils. Life Sciences*, 78(7), 712–718.
- Premoli, A. C., Barceló, M., Volis, S., (2012). ITS sequence divergence supports delimitation of subgenera within *Artemisia*. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 169(1), 40–55.
- Quézel, P., et Santa, S. (1962–1963). *Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales*. CNRS, Paris.
- Reuter S., Gupta S. C., Chaturvedi M. M., Aggarwal B. B. (2010). Oxidative stress, inflammation, and cancer: How are they linked? *Free Radical Biology and Medicine*, 49, 1603–1616.
- Reverchon, E., et De Marco, I. (2006). *Supercritical fluid extraction and fractionation of natural matter. The Journal of Supercritical Fluids*, 38, 146–166.
- Ruberto G., Baratta M. T. (2000). Antioxidant activity of selected essential oil components in two lipid model systems. *Food Chemistry*, 69, 167–174.
- Salehi, B., et al. (2019). *Antioxidant, anti-inflammatory, and antimicrobial properties of essential oils: a review. Cellular and Molecular Biology*, 65(6), 1–15.

- Salido, S., Valenzuela, L. R., Altarejos, J., Nogueras, M., Sánchez, A., Cano, E. (2004). Composition and infraspecific variability of *Artemisia herba-alba* from southern Spain. *Biochemical Systematics and Ecology*, 32(3), 265–277.
- Santoro, G. F., et al. (2007). *Effect of oregano essential oil on growth and ultrastructure of *Candida albicans*. *Mycoses*, 50(4), 231–238.
- Senhaji, A., Arsi, H., Kandri, R., El-Harrouni, T. et Ech-Chennaoui, K. (2020). *Ecology and genetic diversity of Artemisia herba-alba in Moroccan arid zones*. *Acta Botanica Gallica*, 167(3), 191–202.
- Sharifi-Rad J., Mulabagal V., Ciccodicola A., et al. (2017). *Essential oils and their pharmacological effects: A review*. *Current Pharmaceutical Design*, 23, 2731–2741.
- Soković M., Glamočlija J., Marin P. D., Brkić D., van Griensven L. J. L. D. (2010). Antimicrobial effects of spices and herbs essential oils. *Journal of Medicinal Plants Research*, 4, 1416–1420.
- Sovová, H. (2012). *Supercritical CO₂ extraction of essential oil from aromatic plants: from theory to practice*. *The Journal of Supercritical Fluids*, 66, 510–517.
- Srivastava J. K., Shankar E., Gupta S. (2010). *Chamomile: A herbal medicine of the past with a bright future (review)*. *Molecular Medicine Reports*, 3, 895–901.
- Trombetta D., Castelli F., Sarpietro M. G., Venuti V., Cristani M., Daniele C., Bisignano G., Saija A., Mazzanti G. (2005). *Mechanisms of antibacterial action of three monoterpenes*. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 49, 2474–2478.
- Valko M., Leibfritz D., Moncol J., Cronin M. T. D., Mazur M., Telser J. (2007). Free radicals and antioxidants in normal physiological functions and human disease. *The International Journal of Biochemistry et Cell Biology*, 39, 44–84.
- Viuda-Martos M., Ruiz-Navajas Y., Fernández-López J., Pérez-Álvarez J. A. (2010). Chemical composition, antioxidant and antimicrobial activity of essential oils from aromatic plants used in the food industry. *Food Control*, 21, 1–7.
- Younsi, F., Mehdi, S., Aissi, O., Rahali, N., (2017). Essential oil variability in natural populations of *Artemisia herba-alba* and incidence on antioxidant activities. *Chemistry et Biodiversity*, 14(7), e1700017.
- Zohary, M. (2004). *Artemisia hebrida – taxonomy, distribution and variability*. *Willdenowia*, 34(2), 381–389.