



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة ابن خلدون - تيارت -

Université IBN Khaldoun –Tiaret-

كلية علوم الطبيعة والحياة

Faculté des Sciences de la nature et de la vie



**Thèse**

**Présentée pour l'obtention du diplôme de  
Doctorat en Sciences**

**Spécialité : Sciences naturelles**

Présentée par :

**Mme BENSAADI Nawel**

Thème

**Extraction, détermination et valorisation des  
huiles essentielles de Thuya de Maghreb  
« *Tetraclinis articulata* (Vahl) Masters »**

Soutenue publiquement devant le jury composé de :

<b>Président :</b>	MIARA Djamel	<b>Professeur à l'université Ibn Khaldoun. Tiaret</b>
<b>Rapporteur :</b>	MAATOUG M'hamed	<b>Professeur à l'université Ibn Kaldoun. Tiaret</b>
<b>Examineurs :</b>	AZZAOUI Mohamed	<b>MCA à l'université Ibn Khaldoun. Tiaret</b>
	TALEB Mohamed Amine	<b>MCA à l'université de Tissemsilt</b>
	BOUKIRAT Dihya	<b>MCA à l'université de Tissemsil</b>
	MEHDEB Djamilia	<b>MCA à l'Ecole Supérieure D'Agronomie de Mostaganem</b>

2024 -2025

## **Remerciements**

*Louange à dieu seul et à son prophète Mohamed*

*L'achèvement de cette thèse marque la fin d'une aventure longue, intense et enrichissante, et je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à ceux qui m'ont soutenu et guidé tout au long de ce parcours.*

*Mes remerciements s'adressent à mon Directeur de thèse **Mr Maatoug M'hamed**, professeur à l'université Ibn Khaldoun de Tiaret, pour sa confiance, son accompagnement attentif et ces conseils éclairés. Votre rigueur et votre disponibilité ont été une source inestimable de motivation. Je vous suis reconnaissant pour la liberté que vous m'avez accordée dans mes recherches tout en m'orientant avec bienveillance.*

*Je souhaite exprimer ma gratitude aux membres de mon jury :*

***Mr Miara Djamel**, professeur à l'université Ibn Khaldoun de Tiaret, d'avoir accepté de présider ce jury. **Mr Azzaoui Mohamed**, maitres de conférences « A » à l'université Ibn Khaldoun de Tiaret, **Mr Talab Mohamed Lamine**, maitres de conférences « A » à l'université El Wancharissi de Tissemsilt, **Mme Mehdeb Djamila**, maitres de conférences « A » à l'Ecole Supérieure d'Agronomie de Mostaganem et enfin, **Mme Boukirat Dihya**, maitres de conférences « A » à l'université El Wancharissi de Tissemsilt, pour avoir accepté d'évaluer ce travail. Vos observations et vos encouragements me seront précieux pour la suite de mes recherches.*

*Un grand merci à toute l'équipe du laboratoire de l'université de Tiaret et de Tissemsilt, et plus particulièrement à **Mr Khane Mohamed**, **Mme Boulenuar Houda**, **Mr Laafer Mohamed** et **Mme Chahih Hadjira**, pour l'entraide et leurs soutiens de tous les temps.*

*Un immense merci pour **Mr Fatmi Belguendouz**, Chef de triage des forêts de la wilaya de Tiaret, **Mr Saadi Rachid** et mon petit frère **Bouabdelli youcef**, pour leur présence lors de la récolte des échantillons de *Tetraclinis articulata*, ainsi que mon étudiant **Mr Zenati Azzedine**, inspecteur principal des forêts -wilaya de Tiaret- pour son aide précieuse.*

*Mes remerciements vont également à l'endroit de tous mes collègues de l'Istitut des Sciences de la Nature et de la Vie, de Tissemsilt, particulièrement **Mr Zemour Kamel**, pour sa présence et le partage de toutes ses connaissances et **Mme Hellal Noria**, pour son aide et son soutien moral.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mes amis et à mes proches pour leur soutien constant et inestimable. À ma chère mère, qui m'a toujours encouragé et motivé à atteindre mes rêves, à mon cher mari, pour sa compréhension, sa patience et son soutien inébranlable, même dans les moments les plus difficiles, et à mes sœurs, d'avoir toujours été à mes côtés.*

*Enfin, je souhaite remercier toute personne qui m'a inspirée, encouragé, soutenu et aidé, de près ou de loin, tout au long de ce parcours. Merci du fond du cœur*

## ***Dédicace***

*Je dédie ce modeste travail*

*À la mémoire de mon père, qui, bien qu'absent, reste à jamais une source  
d'inspiration et de force dans ma vie.*

*À ma mère, pour son amour inconditionnel, sa présence constante et son  
soutien indéfectible, qui m'ont porté à chaque étape de ce parcours.*

*À mon mari, pour son amour, sa patience et son bon soutien, sans lequel ce travail  
n'aurait pas été possible. Je suis vraiment bénie de l'avoir comme partenaire dans  
ma vie.*

*À mes enfants Younes et Mehdi, mes trésors adorés, pour la joie et la motivation  
que vous m'apportez chaque jour.*

*À mes sœurs Yasmine, Souad, Lila, Asma, Nesrine et la toute dernière Lisa.*

*À mes beaux-parents, mes beaux-frères, ma belle-sœur, à la famille Bensaadi et  
Bouabdelli, et à toute personne proche à mon cœur.*

## *Résumé*

Cette étude vise à déterminer le rendement en huiles essentielles extraites des feuilles de *Tetraclinis articulata* ; espèce de conifère appartenant à la famille des Cupressaceae, endémique d'Afrique du nord, et d'en analyser la composition chimique. Elle s'intéresse également à l'influence de facteurs environnementaux tels que l'exposition géographique, l'altitude et le pH du sol sur la quantité obtenue et la nature des composés volatils. Par ailleurs, l'évaluation de l'activité antioxydante de l'huile essentielle constitue un autre volet essentiel de ce travail, permettant d'en apprécier le potentiel bioactif.

Les huiles essentielles obtenues par hydrodistillation des feuilles de *Tetraclinis articulata* récoltées de la forêt de Sdama Chergui, caractérisée par un climat semi-aride, présentent des rendements variables selon les expositions géographiques, avec des taux de  $0,33 \pm 0,13$  %,  $0,29 \pm 0,07$  %,  $0,24 \pm 0,07$  % et  $0,2 \pm 0,03$  % pour le sud, l'ouest, le nord et l'est respectivement.

L'analyse de la fraction volatile de l'huile essentielle effectuée par GC/MS a permis de mettre en évidence la présence d'environ 89, 93, 89 et 85 molécules chimiques pour les expositions nord, sud, est et ouest représentant respectivement 94,45 %, 92,73 %, 98,77 % et 90,84 % de la composition totale. Cette huile riche en monoterpènes, présente une composition qualitativement semblable mais quantitativement différente. L'acétate de bornyle (9,14 %, 7,95 %, 11,20 % et 9,78 %), le limonène (5,03 %, 7,18 %, 5,76 % et 5,41 %), l' $\alpha$ -pinène (4,97 %, 5,26 %, 5,09 % et 4,79 %), le camphre (7,53 %, 3,69 %, 3,01 % et 5,91 %) et enfin le bornéol (5,20 %, 6,26 %, 4,93 % et 5,11 %) respectivement pour le nord, le sud, l'est et l'ouest, sont les constituants majoritaires de l'huile essentielles des feuilles de *Tetraclinis articulata*.

L'Analyse Factorielle de Données Mixtes (PCAmix) a révélé que les paramètres environnementaux (altitude, pH du sol et exposition) ont peu d'effet sur le rendement, la nature et la distribution des composés chimiques des huiles essentielles de *Tetraclinis articulata*.

Le dosage des polyphénols des huiles essentielles de *Tetraclinis articulata* a démontré des concentrations assez faibles, avec des teneurs de l'ordre de 121.05 mg, 84.84 mg, 60.23 mg et 17.57 mg EAGs/100 g HE pour les expositions est, sud, nord et ouest respectivement.

L'étude de l'activité antioxydante de l'huile essentielle de *Tetraclinis articulata* par le test DPPH a révélé un pourcentage d'inhibition moyen avec 66.97 %, 63.88 %, 56.15 % et 41.23 % pour les huiles essentielles des expositions ouest, nord, est et sud respectivement. Cette activité peut être due à la présence de composés monoterpéniques.

**Mot clés :** *Tetraclinis articulata*, huiles essentielles, rendement, composés chimiques, GC /MS, facteurs environnementaux, activité antioxydante

## ***Abstract***

This study aims to determine the yield of essential oils extracted from the leaves of *Tetraclinis articulata*, a coniferous species belonging to the Cupressaceae family, endemic to North Africa, and to analyze its chemical composition. It also examines the influence of environmental factors such as geographical exposure, altitude, and soil pH on the quantity obtained and the nature of the volatile compounds. Furthermore, the evaluation of the antioxidant activity of the essential oil constitutes another essential aspect of this work, allowing for an assessment of its bioactive potential.

The essential oils obtained by hydrodistillation from the leaves of *Tetraclinis articulata* collected from the Sdama Chergui forest, characterized by a semi-arid climate, showed variable yields depending on geographical exposure, with rates of  $0.33 \pm 0.13\%$ ,  $0.29 \pm 0.07\%$ ,  $0.24 \pm 0.07\%$ , and  $0.2 \pm 0.03\%$  for the south, west, north, and east, respectively.

The analysis of the volatile fraction of the essential oil, conducted by GC/MS, revealed the presence of approximately 89, 93, 89, and 85 chemical compounds for the north, south, east, and west exposures, respectively, representing 94.45%, 92.73%, 98.77%, and 90.84% of the total composition. This oil, rich in monoterpenes, has a qualitatively similar but quantitatively different composition. Bornyl acetate (9.14%, 7.95%, 11.20%, and 9.78%), limonene (5.03%, 7.18%, 5.76%, and 5.41%),  $\alpha$ -pinene (4.97%, 5.26%, 5.09%, and 4.79%), camphor (7.53%, 3.69%, 3.01%, and 5.91%), and finally borneol (5.20%, 6.26%, 4.93%, and 5.11%) for the north, south, east, and west, respectively, are the major constituents of the essential oils from the leaves of *Tetraclinis articulata*.

The analysis of these molecules using Factorial Analysis of Mixed Data (PCAmix) revealed that environmental factors (altitude, soil pH, and exposure) have little effect on the yield, nature, and distribution of the chemical compounds in the essential oils of *Tetraclinis articulata*. It is important to consider stationary factors to obtain high-quality essential oils in optimal quantities.

The determination of polyphenol content using the Folin-Ciocalteu method for *Tetraclinis articulata* essential oils revealed relatively low concentrations, with values of 121.05 mg, 84.84 mg, 60.23 mg 17.57 mg EAGs/100 g EO for the east, south, north, and west exposures, respectively.

The study of the antioxidant activity of the essential oil of *Tetraclinis articulata* using the DPPH test revealed an average inhibition percentage of 66.97%, 63.88%, 56.15%, and 41.23% for the essential oils from the west, north, east, and south exposures, respectively. This activity can be attributed to the presence of monoterpenic compounds.

**Keywords:** *Tetraclinis articulata*, essential oils, yield, Chemical compounds, GC/MS, environmental factors, antioxidant activity.

## الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تحديد مردود الزيوت الأساسية المستخلصة من أوراق نبات *Tetraclinis articulata*، وهو نوع من الصنوبريات ينتمي إلى عائلة *Cupressaceae* ومتوطن في شمال إفريقيا، بالإضافة إلى تحليل تركيبها الكيميائي. كما تهدف إلى دراسة تأثير بعض العوامل البيئية، مثل الموقع الجغرافي، الارتفاع، ودرجة حموضة التربة، على كمية الزيوت المنتجة وطبيعة المركبات الطيارة المكونة لها. تسعى هذه الدراسة كذلك إلى تقييم النشاط المضاد للأكسدة للزيوت الأساسية، باعتباره مؤشراً هاماً على الفعالية الحيوية والمردودية الطبية المحتملة لهذه المستخلصات الطبيعية. فقد تم الحصول على الزيوت الأساسية عن طريق التقطير المائي لأوراق *Tetraclinis articulata* التي تم جمعها من غابة سدّامة شرقي، المعروفة بمناخها شبه الجاف، وأسفرت النتائج عن اختلاف في نسب المردود تبعاً للاتجاهات الجغرافية، حيث بلغت في الجهة الجنوبية  $0.13 \pm 0.33\%$ ، في الجهة الغربية  $0.07 \pm 0.29\%$ ، في الجهة الشمالية  $0.07 \pm 0.24\%$ ، أما في الجهة الشرقية  $0.03 \pm 0.2\%$ .

أظهر تحليل الجزء المتطاير من الزيت العطري باستخدام كروماتوغرافيا الغاز/مقياس الطيف الكتلي (GC/MS) وجود حوالي 89، 93، 89، و85 مركباً كيميائياً للاتجاهات الشمالية، الجنوبية، الشرقية والغربية على التوالي، حيث تمثل 94.45%، 92.73%، 98.77% و90.84% من التركيب الكلي. يتميز هذا الزيت بثرائه بالمونوتيربينات، وهو ذو تركيبة نوعية متشابهة ولكنها تختلف كمياً. كان أسيتات البورنيول (9.14%، 7.95%، 11.20% و9.78%)، الليمونين (5.03%، 7.18%، 5.76% و5.41%)، الألفا-بينين (4.97%، 5.26%، 5.09% و4.79%)، الكافور (7.53%، 3.69%، 3.01% و5.91%) وأخيراً البورنيول (5.20%، 6.26%، 4.93% و5.11%) هي المكونات الرئيسية للزيوت العطرية المستخرجة من أوراق *Tetraclinis articulata*، على التوالي بالنسبة للاتجاهات الشمالية، الجنوبية، الشرقية والغربية. كشف تحليل هذه الجزيئات باستخدام التحليل العاملي للبيانات المختلطة (PCAmix) أن العوامل البيئية (الارتفاع، درجة حموضة التربة والتعرض) لها تأثير ضئيل على العائد وطبيعة وتوزيع المركبات الكيميائية في الزيوت العطرية لنبات *Tetraclinis articulata*. من المهم أخذ العوامل البيئية بعين الاعتبار للحصول على زيوت عطرية ذات جودة عالية وبكميات مثلى.

تم تحديد محتوى البوليفينولات باستخدام طريقة Folin-Ciocalteu لزيوت *Tetraclinis articulata* الأساسية، حيث أظهرت التراكيز نتائج منخفضة نسبياً، مع قيم بلغت 121.05mg، 84.84mg، 60.23mg و17.57mg EAGs/100 جرام من الزيت الأساسي للجهات الشرقية، الجنوبية، الشمالية والغربية على التوالي. أظهرت دراسة النشاط المضاد للأكسدة للزيت العطري لنبات *Tetraclinis articulata* باستخدام اختبار DPPH نسبة تثبيط متوسطة بلغت 66.97%، 63.88%، 56.15% و41.23% بالنسبة للزيوت العطرية المستخرجة من الاتجاهات الغربية، الشمالية، الشرقية والجنوبية على التوالي. قد يعود هذا النشاط إلى وجود مركبات مونوتيربينية.

**الكلمات المفتاحية:** *Tetraclinis articulata*، الزيوت العطرية، المردودية، المركبات الكيميائية، GC /MS، العوامل البيئية، النشاط المضاد للأكسدة

## Table des matières

<b>Remerciements</b>	
<b>Dédicace</b>	
<b>Résumé</b>	
<b>Abstract</b>	
<b>المخلص</b>	
<b>Liste des figures</b>	
<b>Liste des tableaux</b>	
<b>Liste des abréviations</b>	
<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>Partie I. Synthèse bibliographique</b>	<b>5</b>
<b>I. <i>Tetraclinis articulata</i></b>	<b>5</b>
<b>I.1. Présentation de la plante</b>	<b>5</b>
<b>I.2. Synonymes</b>	<b>5</b>
<b>I.3. Répartition géographique</b>	<b>6</b>
<b>I.4. Description botanique</b>	<b>6</b>
<b>I.5. Systématique de <i>Tetraclinis articulata</i></b>	<b>8</b>
<b>I.6. Ecologie du thuya</b>	<b>9</b>
I.6.1. Facteurs climatiques	9
I.6.2. Facteurs édaphiques	9
I.6.3. Altitude	9
<b>I.7. Importance et utilisation du Thuya</b>	<b>10</b>
I.7.1. Artisanale	10
I.7.2. Médecine traditionnelle	10
I.7.3. Ecologie	11
I.7.4. Economie et industrie	11
<b>II. Les huiles essentielles</b>	<b>12</b>
<b>II.1. Introduction</b>	<b>12</b>
<b>II.2. Définition de l'huile essentielle</b>	<b>13</b>
<b>II.3. Répartition et localisation</b>	<b>13</b>
<b>II.4. Les voies de Biosynthèse</b>	<b>14</b>
II.4.1. Voie de synthèse des terpénoïdes	14
II.4.2. Voie de synthèse des phénylpropanoïdes ou voie de l'acide shikimique	14

<b>II.5. Composition chimique des huiles essentielles</b>	<b>15</b>
II.5.1. Isoprenoïde	15
II.5.2. Phénylpropanoïde	15
II.5.3. Dérivés de polycétides et de lipides	16
II.5.4. Dérivés d'acides aminés autres que L-phénylalanine	16
<b>II.6. Méthodes d'identification chimique</b>	<b>17</b>
II.6.1. Chromatographie en phase gazeuse (CPG)	17
II.6.2. Chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GPC/SM)	18
<b>II.7. Techniques d'extraction des huiles essentielles</b>	<b>18</b>
II.7.1. Extraction par expression à froid	18
II.7.2. Extraction par enfleurage	19
II.7.3. Extraction par solvant organique volatil	20
II.7.4. Hydrodistillation	20
II.7.5. Distillation par entraînement à la vapeur	21
II.7.6. Extraction par ultrason	22
II.7.7. Extraction par micro-onde	23
II.7.8. Extraction par CO <sub>2</sub> supercritique	24
<b>II.8. Activités biologiques des huiles essentielles</b>	<b>25</b>
II.8.1. Activité antibactérienne	25
II.8.2. Activité antivirale	26
II.8.3. Activité antifongique	26
II.8.4. Activité antioxydante	27
<b>II.9. Toxicité des huiles essentielles</b>	<b>27</b>
<b>II.10. Utilisation des huiles essentielles</b>	<b>28</b>
II.10.1. En agroalimentaire	28
II.10.2. En agriculture	29
II.10.3. En cosmétologie et parfumerie	29
II.10.4. En Pharmacie	29
II.10.5. En industrie	30
<b>III. Le stress oxydatif</b>	<b>30</b>
<b>III.1. Les Origines des ROS et du Stress Oxydatif</b>	<b>30</b>
<b>III.2. Balance des ROS intracellulaires et systèmes antioxydants</b>	<b>32</b>
<b>III.3. Systèmes antioxydants cellulaires</b>	<b>33</b>
<b>III.4. Les ROS comme molécules de signalisation</b>	<b>35</b>

<b>III.5. Double Rôle des ROS : Physiologique et Pathologique</b>	<b>36</b>
<b>III.6. L'activité antioxydante des huiles essentielles de plantes</b>	<b>38</b>
<b>Partie II. Etude expérimentale</b>	<b>43</b>
<b>I. Présentation de la zone d'étude</b>	<b>43</b>
<b>I.1. Introduction</b>	<b>43</b>
<b>I.2. Situation de la forêt de Sdama Chergui</b>	<b>43</b>
I.2.1. Situation géographique	43
I.2.2. Situation administrative	44
I.2.3. Situation forestière	45
I.2.4. Situation cartographique	45
<b>I.3. Description du milieu physique</b>	<b>46</b>
I.3.1. Le relief	46
I.3.2. La pente	47
<b>I.4. Hydrographie</b>	<b>48</b>
<b>I.5. Pédologie</b>	<b>49</b>
I.5.1. Sols minéraux bruts	49
I.5.2. Sols peu évolués	49
I.5.3. Sols sesquioxides de fer	49
I.5.4. Sols calcimagnésiques	49
<b>I.6. Etude climatique</b>	<b>50</b>
I.6.1. Les facteurs climatiques	50
I.6.1.1. Les précipitations	50
I.6.1.2. La température	51
I.6.1.3. Facteurs climatiques supplémentaires	52
I.6.1.3.1. Le vent	52
I.6.1.3.2. L'humidité relative	52
I.6.1.3.3. Les gelées	53
I.6.2. Synthèse climatique	53
I.6.2.1. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen	53
I.6.2.2. Quotient pluviométrique d'Emberger	54
<b>I.7. La végétation</b>	<b>56</b>
<b>II. Matériels et méthodes</b>	<b>57</b>
<b>II.1. Objectif</b>	<b>57</b>
<b>II.2. Matériel végétal et échantillonnage</b>	<b>57</b>

<b>II.3. Détermination du pH du sol</b>	<b>58</b>
<b>II.4. Extraction de l'huile essentielle</b>	<b>58</b>
<b>II.5. Calcul du rendement</b>	<b>58</b>
<b>II.6. Caractérisation chimique des huiles essentielles de <i>Tetraclinis articulata</i></b>	<b>58</b>
II.6.1. Analyse par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse(GC/MS)	59
II.6.2. Identification des composés chimiques	59
<b>II.7 Dosage des polyphénols totaux</b>	<b>59</b>
II.7.1. Principe	60
II.7.2. Mode opératoire	60
<b>II.8. Mesure du pouvoir de piégeage des radicaux DPPH</b>	<b>60</b>
II.8.1. Principe	61
II.8.2. Mode opératoire	61
<b>III. Résultats et discussion</b>	<b>62</b>
<b>III.1. pH du sol</b>	<b>62</b>
<b>III.2. Extraction et caractérisation chimique des huiles essentielles de <i>Tetraclini articulata</i></b>	<b>62</b>
III.2.1. Rendement en huile essentielle	62
III.2.2. Composition chimique de l'huile essentielle de <i>Tetraclinis articulata</i>	65
<b>III.3. Relation : paramètres environnementaux- rendement- composition chimique des huiles essentielles de <i>Tetraclinis articulata</i> par l'Analyse Factorielle de Données Mixtes (PCAmix)</b>	<b>75</b>
<b>III.4. Taux des polyphénols totaux</b>	<b>79</b>
<b>III.5. Activité antioxydante</b>	<b>81</b>
<b>Conclusion</b>	<b>86</b>
<b>Références bibliographiques</b>	<b>90</b>

## *Liste des figures*

<b>Figure 1</b> : <i>Tetraclinis Articulata</i> dans son milieu naturel _____	<b>8</b>
<b>Figure 2</b> : Diversité des structures de sécrétion des huiles essentielles _____	<b>14</b>
<b>Figure 3</b> : Principaux groupes de constituants des huiles essentielles _____	<b>17</b>
<b>Figure 4</b> : Schéma du montage de l'extraction par la pression à froid _____	<b>19</b>
<b>Figure 5</b> : Schéma du montage de l'extraction par hydrodistillation _____	<b>21</b>
<b>Figure 6</b> : Schéma d'une installation d'entraînement à la vapeur _____	<b>22</b>
<b>Figure 7</b> : Dispositif d'extraction d'huile essentielle par ultrasons _____	<b>22</b>
<b>Figure 8</b> : Schéma du montage de l'extraction par micro-onde _____	<b>23</b>
<b>Figure 9</b> : Schéma du montage de l'extraction par CO <sub>2</sub> supercritique _____	<b>25</b>
<b>Figure 10</b> : Schéma du stress oxydatif et de ses sources intracellulaires et extracellulaires ____	<b>32</b>
<b>Figure 11</b> : Présentation schématique des systèmes d'antioxydation avec des antioxydants enzymatiques et non enzymatiques _____	<b>35</b>
<b>Figure 12</b> : Influence des niveaux de ROS sur les processus cellulaires et les résultats biologiques _____	<b>36</b>
<b>Figure 13</b> : L'action des ROS sur l'ADN, les lipides et les protéines conduit respectivement à l'oxydation des bases de l'ADN, à la peroxydation lipidique et à la carbonylation des protéines. * (électron non apparié) _____	<b>38</b>
<b>Figure 14</b> : Carte de situation géographique de Sdama Chergui _____	<b>44</b>
<b>Figure 15</b> : Carte de découpage en cantons du massif des Sdamas Chergui _____	<b>45</b>
<b>Figure 16</b> : Carte des altitudes du massif forestier de Sdama Chergui _____	<b>47</b>
<b>Figure 17</b> : Précipitation mensuelle moyenne de la région de Tiaret entre 1984 et 2019 _____	<b>51</b>
<b>Figure 18</b> : Quantités de précipitations mensuelles de la région de Tiaret entre 2006 et 2019 _	<b>51</b>
<b>Figure 19</b> : Températures moyennes de la région de Tiaret entre 1984 et 2019 _____	<b>52</b>
<b>Figure 20</b> : Diagramme ombrothermiques de la région de Tiaret (2011-2020) _____	<b>54</b>
<b>Figure 21</b> : Climagramme d'Emberger et position de la wilaya de Tiaret durant la période 2011-2020 _____	<b>55</b>
<b>Figure 22</b> : Réaction entre le radical DPPH* et l'antioxydant pour former le DPPH stable ____	<b>61</b>
<b>Figure 23</b> : Huile essentielle de <i>Tetraclinis articulata</i> _____	<b>62</b>
<b>Figure 24</b> : Rendement moyen en huiles essentielles de <i>Tetraclinis articulata</i> _____	<b>63</b>
<b>Figure 25</b> : Chromatogramme des huiles essentielles de <i>Tetraclinis articulata</i> obtenu par GC/MS à partir de différentes expositions _____	<b>70</b>

<b>Figure 26 :</b> Paramètres du milieu- rendement- composition chimique des huiles essentielles de <i>Tetraclinis articulata</i> obtenues par l'Analyse Factorielle de Données Mixtes (PCAmix) _____	<b>77</b>
<b>Figure 27 :</b> Courbe d'étalonnage des polyphénols par l'acide Gallique _____	<b>79</b>
<b>Figure 28 :</b> Proportion de polyphénols totaux des huiles essentielles de <i>Tetraclinis articulata</i> selon les expositions géographiques _____	<b>80</b>
<b>Figure 29:</b> Pourcentage d'inhibition de l'huile essentielle de <i>Tetraclinis articulata</i> en fonction des expositions géographiques _____	<b>81</b>

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau 1</b> : Classification botanique de <i>Tetraclinis articulata</i> _____	<b>8</b>
<b>Tableau 2</b> : Les classes de pentes _____	<b>47</b>
<b>Tableau 3</b> : Quotient pluviométrique de Stewart _____	<b>55</b>
<b>Tableau 4</b> : pH du sol et altitude de la zone d'étude _____	<b>62</b>
<b>Tableau 5</b> : Composition chimique (%) de l'huile essentielles des feuilles de <i>Tetraclinis articulata</i> provenant de différentes expositions dans des conditions semi-arides _____	<b>65</b>
<b>Tableau 6</b> : Taux de composés chimiques des différentes familles dans les huiles essentielles de <i>Tetraclinis articulata</i> en fonction des expositions _____	<b>73</b>

## *Liste des abréviations*

**ADN** : Acide désoxyribonucléique

**ADNmt** : ADN mitochondrial

**ACP** : Analyse en Composantes Principales ordinaire

**ATP** : Adénosine triphosphate

**BHA** : Butylhydroxyanisole

**BHT** : Butylhydroxytoluène

**CAT** : Catalase

**CFT** : Conservation Forêt de Tiaret

**CG/MS** : Chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse

**CI<sub>50</sub>** : Concentration inhibitrice 50

**Cm** : Centimètre

**CO<sub>2</sub>** : Dioxyde de carbone

**CPG** : Chromatographie en phase gazeuse

**Cu** : Cuivre

**Da** : Dalton

**ddl** : degré de liberté

**DPPH** : 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle

**EROs** : Espèces Réactives de l'Oxygène

**ETC** : Chaîne de transport des électrons

**eV** : Electronvolt

**FID** : flame ionization detectors

**GAEs** : Gallic Acid Equivalents

**GPx** : Glutathion peroxydase

**GR** : Glutathion réductase

**GST** : Glutathion S-transférase

**Ha** : Hectare

**HD** : Hydrodistillation

**HD-MO** : Hydrodistillation assistée par micro-ondes

**HE** : Huile Essentielle

**HEs** : huiles essentielles

**H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>** : Peroxyde d'hydrogène

**IFN** : Inventaire forestier National

**IPP**: Isopentylpyrophosphate

**JP**: *Juniperus phoenicea*

**Kg**: Kilogramme

**M** : Mètre

**ACM** : Analyse des Correspondances Multiples

**ml** : Millilitre

**mm** : Millimètre

**Mn** : Manganèse

**NADPH (NO<sub>x</sub>)** : Nicotinamide adénine dinucléotide phosphate réduit oxydase

**Nm** : Nanomètre

**O<sub>2</sub>**: Oxygène

**OMS** : Organisation Mondiale de la Santé

**THF** : Tétra-hydro-furane

**Tr** : Temps de rétention

**P** : Précipitation

**PCAmix** : Analyse en Composantes Principales Mixte

**PEP** : Phosphoénolpyruvate

**PH** : potentiel d'Hydrogène

**PPT** : Polyphénols totaux

**Prxs** : Peroxyrédoxines

**RE** : Réticulum endoplasmique

**ROS** : Reactive Oxygen Species

**SARS-CoV-2**: Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2

**SO**: Stress oxydatif

**SOD**: Superoxyde Dismutase

**T**: Température

**TA** : *Tetraclinis articulata*

**TPF** : Travaux de Protection Forestière

**XO** : Xanthine oxydase

**Zn** : Zinc

° **C** : Degré celcius

°**K** : Degré Kelvin

# **Introduction**

### Introduction

Depuis des millénaires, différentes cultures à travers le monde ont eu recours aux plantes médicinales pour traiter divers maux et promouvoir la santé. Ces mêmes plantes sont utilisées à des fins médicinales en raison de leurs propriétés curatives et préventives. Les plantes médicinales constituent un énorme réservoir de substances bioactives utilisées en médecine traditionnelle pour traiter un certain nombre de maladies et d'infections **(El Khasmi et Farh, 2022)** ainsi que dans les industries pharmaceutiques, alimentaires, cosmétiques et de parfumerie **(Ouarghidi et Abbad, 2019)**.

A partir de ces plantes, l'homme a su en extraire le meilleur et c'est dans l'huile essentielle que réside l'essentiel du règne végétal. Synthétisés en réponse à des stimuli environnementaux, les huiles sont une essence concentrée en métabolites odorants et volatils, reconnus à travers le monde pour leurs propriétés aromatiques, cosmétiques et même thérapeutiques.

L'Algérie se distingue par une diversité floristique exceptionnelle, attribuable à la variété de ses paysages et de son climat, renfermant plus de 4000 taxons **(Belhouala et Benarba, 2021)** dont plus de 600 espèces sont des plantes médicinales et aromatiques **(Souilah et al., 2018)**. Elle abrite également des espèces végétales endémiques, spécifique à cette région.

Le *Tetraclinis articulata* (Vahl) Master, ou bien le Thuya de Berbérie communément appelé « araar » est un arbre de la famille des cupressacées formant de vastes forêts, endémique de l'Afrique du nord (Maroc, Algérie et Tunisie) **(Esteve Selma et al., 2019)**.

Ce résineux est exploité pour son bois rouge à odeur prononcée, employé dans le domaine de la marqueterie artisanale et l'ébénisterie, et comme combustible pour la production de chaleur **(Bourkhiss et al., 2016 ; hadjadj et letreuch, 2017)**

Des travaux phytochimiques réalisés sur *Tetraclinis articulata* ont principalement porté sur l'analyse de ses huiles essentielles, extraites des différentes parties de la plante, notamment les feuilles **(Eddabbeh et al., 2021 ; Khatib et al., 2024)**, les rameaux **(Zrekani et al., 2019)**, l'écorce **(Jlizi et al., 2021)**, les cônes **(Sadiki et al., 2022)** et parfois même la sciure de bois **(Saber et al., 2021)**.

Ces recherches ont révélé une richesse en composés terpéniques. Parmi les constituants majoritaires identifiés figurent l'acétate de bornyl, l' $\alpha$ -pinène, le limonène, le bornéol, le camphre, le caryophyllène ainsi que d'autres (**Benjemaa et al., 2022 ; Boufares et al., 2019 ; Bourkhiss et al., 2023**), composés qui confèrent à l'huile essentielle son arôme caractéristique et son intérêt pharmacologique. La composition chimique varie toutefois selon l'origine géographique, les conditions climatiques, le stade de développement de la plante et les méthodes d'extraction utilisées (**Zerkani et al., 2019 ; Khalil et al., 2020 ; Khatib et al., 2024**)

Sur le plan thérapeutique, le thuya est considéré comme une plante médicinale d'excellence grâce à l'efficacité de ses composés actifs présents dans les extraits ou les huiles essentielles de ces différentes parties, lui conférant des propriétés antibactériennes (**Zerkani et al., 2019 ; Bourkhiss et al., 2021**), antiradicalaires (**Boussaid, 2017**), antifongiques (**Hamdani et al., 2021 ; Benjemaa et al., 2022**), anti-inflammatoires (**El Jemli, 2020**), insecticides (**CHEBHEB, 2014**), et anti-cancéreuses (**Calderón-Montaña et al., 2021**). Mais aussi, le thuya est fréquemment utilisé pour traiter les troubles digestifs et constitue un bon antiseptique (**Senouci et al., 2023**).

Ces dernières années, l'étude de l'activité antioxydante a suscité un intérêt croissant en raison de son rôle crucial dans la protection contre les dommages oxydatifs causés par les radicaux libres, qui sont impliqués dans diverses maladies chroniques telles que le cancer, les maladies cardiovasculaires, et le vieillissement prématuré (**Roberts et Sindhu, 2009**).

L'accent est mis sur l'identification et l'extraction d'antioxydants à partir de plantes médicinales, de fruits, de légumes, d'algues et d'épices. Des composés tels que les flavonoïdes, polyphénols, et les vitamines (comme la vitamine C et E) sont étudiés pour leur capacité à neutraliser les radicaux libres. Les huiles essentielles et leurs composants (comme les monoterpènes, les phénols) sont également explorés pour leurs activités antioxydantes.

Dans un contexte où les huiles essentielles de *Tetraclinis articulata* suscitent un intérêt croissant en raison de leurs propriétés thérapeutiques et biologiques, comment les facteurs environnementaux tels que le pH du sol, l'altitude et l'exposition géographique influencent-ils le rendement, la composition chimique et les propriétés antioxydantes de ces huiles ? En quoi cette variabilité pourrait-elle être exploitée pour maximiser leur valorisation dans les secteurs cosmétique, pharmaceutique, et agroalimentaire ?"

Notre objectif, dans un premier temps est l'extraction puis l'identification des principaux constituants des huiles essentielles de l'espèce choisie par la technique GC/MS. Une Analyse Factorielle de Données Mixtes (PCAmix) est utilisée par la suite pour évaluer l'influence de certains facteurs environnementaux, tels que l'altitude, l'exposition géographique et le pH du sol, sur la quantité ainsi que la qualité des composés volatils obtenus. Enfin, l'activité antioxydante des huiles extraites sera mesurée à l'aide de test DPPH, dans le but de valoriser leur potentiel bioactif en lien avec les conditions écologiques dans lesquelles les plantes se développent.

Le travail réalisé s'articule de la façon suivante :

- La première partie est consacrée à une synthèse bibliographique mettant l'accent sur la description de l'espèce végétale étudiée, s'intéresse à des généralités sur les huiles essentielles et sur le stress oxydatif
- La seconde partie traite le côté expérimental de cette thèse avec la présentation de la zone d'étude, renseignent sur les matériels et exposant une description des méthodes expérimentales utilisées, et enfin présentation des principaux résultats et leurs interprétations ainsi qu'une comparaison avec la littérature.

Cette étude est clôturée par une conclusion résumant les principaux résultats et suggérant des perspectives de recherches future.

# **Partie I**

## **Synthèse bibliographique**

## Partie I. Synthèse bibliographique

### I. *Tetraclinis articulata*

#### I.1. Présentation de la plante

Le thuya de Berbérie (*Tetraclinis articulata* (Vahl) Masters), aussi connu sous le nom de thuya articulé (**Brosse, 2004 ; Farjo, 2010**), est un arbre résineux mesurant entre 5 et 15 mètres de hauteur (**Tassin, 2012**). Il appartient à la famille des Cupressacées et est presque endémique de l'Afrique du Nord. On le trouve principalement au Maghreb, bien que des populations résiduelles existent sur la côte sud-est de l'Espagne, dans la région de Carthagène, ainsi qu'à Malte, où l'espèce est en danger d'extinction (**Quézel et Médail, 2003**). En Algérie, la superficie actuelle du thuya de Berbérie est inférieure à 140 000 hectares, une diminution notable par rapport aux 160 000 hectares recensés autrefois (**Boudy, 1950 ; Haddad et al., 2006**). L'espèce se trouve également à l'état isolé dans certaines régions littorales de l'Algérois, particulièrement à l'ouest d'Alger, tandis qu'elle est plus répandue sur le littoral de l'Oranie (**Quézel et Médail, 2003**). Au Maroc, cette espèce s'étend sur environ 565 798 hectares, alors qu'en Tunisie, sa superficie atteint près de 30 000 hectares (**Blerot et Mhirit, 1999**).

Le nom "*Tetraclinis*" fait référence aux fruits en strobiles à quatre écailles, tandis que l'épithète "*articulata*" décrit la forme articulée de ses branches (**Carillo Lopez et al., 2017**).

L'espèce a été initialement décrite par Vahl en 1791 sous le nom de *Thuya articulata*, également connu sous le synonyme *Callitris articulata* (Vahl) Link. Plus tard, en 1962, Maire l'a rattachée au genre *Tetraclinis*, et **Quézel et Santa (1962-1963)** ont noté son appartenance possible au genre *Callitris*, nommé par Vent en 1808 sous l'appellation *Callitris quadrivalvis* Vent (**Hadjadj et Letreuch, 2017**).

#### I.2. Synonymes

*Tetraclinis articulata* connu sous plusieurs noms à travers le monde, porte des appellations variées en fonction de la langue et de la région :

- **En arabe** : Araar (عرعار), Araar berboush (عرعار بربوش), Sandarus (سنزروس), Shajarat-el-hayat (شجرة الحياة) (**Baba-Aissa, 2011**).
- **En berbère** : Azouka, Imijad, Tazout (**Igri et al., 1990**)

### I.3. Répartition géographique

Le *Tetraclinis articulata* est une espèce exclusive de l'Afrique du Nord-Ouest, se trouvant principalement au Maroc, en Algérie, en Tunisie, ainsi qu'à Malte et en Espagne (**Djouahri, 2013**).

En Afrique du Nord, ses peuplements couvrent environ un million d'hectares, avec une forte concentration au Maroc (900 000 ha), en particulier sur le plateau central, depuis le nord du Rif jusqu'à l'Anti-Atlas et la région d'Ifni. En revanche, il est absent dans le sud-est du Maroc steppique, il occupe l'étage bioclimatique semi-aride. En Tunisie, il est bien présent avec une occupation de 30000 ha, entre Bizerte et Zaghouan (**Boudy, 1950**).

En Algérie, les forêts de *Tetraclinis articulata* couvraient environ 161 000 hectares au début du siècle dernier (**Benabdelli, 1992**), tandis qu'à la fin de cette période, les estimations de l'administration des forêts variaient entre 143 000 et 130 000 hectares (**Quézel et Santa, 1962-1963 ; Letrech, 1991 ; Maatoug et al., 2004 ; Boussaid, 2017**). Selon ces auteurs, le thuya est très répandu dans le secteur Oranais, assez présent dans le secteur Algérois et dans les hauts plateaux, mais il est très rare en grande Kabylie. Dans la région Algéro-Ouarsienne, les peuplements de thuya ne sont pas distincts et se mélangent fréquemment avec le pin d'Alep. On les retrouve dans les circonscriptions de Cherchel, Médéa, Ténès et Theniet el Had, fréquemment sous forme de vieux taillis endommagés par les incendies. On les rencontre également dans les régions de Dellys et Lakhdaria sous forme individuelles ou de petits groupes, ainsi que dans la vallée de l'Oued Sahel, près de M'Chedallah, sur le piémont sud du Djurdjura (**Hadjadj, 1995 ; Hadjadj et Letrech Belarouci, 2017**).

### I.4. Description botanique

Le thuya de Berbérie est une essence résineuse de la famille des Cupressacées, caractérisée par une croissance très lente et une longévité exceptionnelle, pouvant dépasser 400 ans. Il atteint une taille modérée avec une croissance rapide dans ses premières années, ralentissant avec l'âge (**El Mouridi, 2011 ; Tassin, 2012**).

*Tetraclinis articulata* est une plante robuste et xérophile de la famille des conifères, qui produit des cônes (**Hadjadj et Letrech Belarouci, 2017**). C'est également une espèce résineuse, capable de produire de la résine, à l'instar d'autres conifères tels que les cèdres, cyprès, pins et sapins.

Le *Tetraclinis articulata* possède une cime aérée et une silhouette pyramidale irrégulière. Son feuillage, persistant, est composé de feuilles disposées en verticilles de quatre, qui sont longuement attachées à la tige. Ces feuilles, squamiformes, aplaties et pointues, forment des groupes de quatre, avec les feuilles latérales étant plus grandes que les feuilles basales. Les pointes des feuilles sont libres, en forme d'écailles et aiguës. De plus, elles contiennent des glandes résineuses, caractéristiques des espèces résineuses (**Brosse, 2004 ; Hedjal, 2014**).

Les petites branches verdâtres et aplaties sont déposées de manière segmentée selon la disposition des feuilles. Elles sont fines, flexibles, mais deviennent cassantes aux points d'articulation entre les feuilles. Le tronc parfumé et droit, présente une écorce de couleur gris clair qui devient plus sombre et fendillée longitudinalement avec l'âge, produit un bois de couleur marron clair, marqué de fines veines parallèles. Les branches sont denses, érigées, et se ramifient en segments aplatis. Les rameaux sont parés de feuilles et articulés, ce qui explique le nom de *Tetraclinis articulata* (**Quezel et Medail, 2003**). Le système racinaire est bien développé et robuste (**Rached, 2009**).

Les cônes du *Tetraclinis articulata* sont petits et arrondis, mesurant de 10 à 12 mm de diamètre, avec une couleur glauque et une texture cireuse. Ils sont composés de quatre écailles ligneuses triangulaires, dotées de petites pointes sur le dessus. À maturité, les écailles se séparent pour libérer des graines ailées (**Brosse, 2004**). L'ouverture des cônes, qui est influencée par la chaleur, n'a lieu qu'à la fin de l'été (**Hadjadj et al., 2009**). Ces cônes sont également pruineux et présentent quatre valves, chacune couronnée d'un appendice plat et réfléchi au sommet (**Quézel et Santa, 1962**).

La plante est monoïque, elle fleurit au début du printemps (mars) et produit des fruits en été (juin-juillet), dont la maturation est presque complète en juillet (**Quezel et Medail, 2003**). La floraison a lieu au printemps (**Bourkhiss et al., 2011**), et la fructification commence vers l'âge de 15 ans.

La figure 1 représente la description botanique de *Tetraclinis articulata*.



**Figure 1:** *Tetraclinis articulata* dans son milieu naturel (Originale, 2022)

### I.5. Systématique de *Tetraclinis articulata*

Le thuya de Berbérie (*Tetraclinis articulata*) a été initialement décrit par **Vahl en 1791** sous le nom de *Thuja articulata*, avant d'être reclassé dans le genre *Tetraclinis* par **Maire en 1962**.

**Quezel et Santa (1962)** ont classé le *Tetraclinis articulata* comme suit :

**Tableau 1:** Classification botanique de *Tetraclinis articulata*

<b>Embranchement</b>	Spermaphytes
<b>Sous Embranchement</b>	Gymnospermes
<b>Classe</b>	Conifères
<b>Ordre</b>	Coniférales
<b>Famille</b>	Cupressacées
<b>Genre</b>	<i>Tetraclinis</i>
<b>Espèce</b>	<i>Tetraclinis articulata</i>

## I.6. Ecologie du thuya

### I.6.1. Facteurs climatiques

Du point de vue bioclimatique, le thuya est une essence thermophile et xérophile qui s'adapte au stress causé par la sécheresse. Etant une espèce anisohydrique, *Tetraclinis articulata* supporte bien les variations d'eau dans son environnement (**Rozas et al., 2022**). Ses conditions idéales de croissance se trouvent dans l'étage bioclimatique semi-aride de la Méditerranée occidentale, à variante chaude et tempérée. Il a également la capacité de se développer dans un environnement sub-humide à température douce et tempérée, sur des sols bien drainés, comme les calcaires. Cependant, il craint les froids humides, qui entravent son développement en altitude (**White, 1986**) et préfère les expositions ensoleillées (**Quezel, 2000 ; Terras et al., 2008 ; Emberger, 1930 ; Benabib, 1976**).

En Algérie, le thuya se trouve principalement l'étage semi-aride, qui est le plus répandu en Oranie, mais il peut s'étendre dans l'étage sub-humide, surtout grâce à l'altitude (**Hadjadj-Aoul, 1988**).

### I.6.2. Facteurs édaphiques

Le *Tetraclinis articulata* préfère les sols bien drainés, notamment les sols calcaires et filtrants, qui assurent une bonne circulation de l'eau tout en évitant l'excès d'humidité. Cette espèce se développe principalement sur des sols pauvres et arides, caractéristiques des régions semi-arides et méditerranéennes. Elle préfère des sols légèrement acides à neutres, car elle ne tolère pas les sols trop acides ou trop riches en matière organique. Le thuya de Berbérie se rencontre sur des sols secs et pauvres, qu'ils soient siliceux, calcaires ou fersiallitiques, souvent peu profonds. Cependant, il montre une préférence pour les sols calcaires, qui sont plus aérés et plus chauds. Il évite les sols sableux, mais prospère bien sur les dunes fixes (**Hadjadj, 1995 ; Boudy, 1952**).

### I.6.3. Altitude

Le *Tetraclinis articulata* se rencontre dans une large gamme altitudinale, allant du niveau de la mer jusqu'à environ 1 800 mètres d'altitude, dans des zones à climat méditerranéen semi-aride (**Terras et al., 2008**). Il se développe principalement dans la zone thermo-méditerranéenne, mais peut également pénétrer dans les régions méso-méditerranéennes.

## I.7. Importance et utilisation du Thuya

Le *Tetraclinis articulata*, également connu sous le nom de thuya de Berbérie, possède de multiples usages grâce à ses propriétés distinctives, que ce soit pour des applications traditionnelles ou industrielles :

### I.7.1. Artisanale

Le *Tetraclinis articulata* est très prisé dans l'artisanat, surtout au Maghreb, où il revêt une importance économique et sociale notable. Son bois résineux, d'une teinte rouge et très dense, dégage un parfum distinctif (**Lapie et Maige, 1914**). Ce bois est particulièrement adapté à l'ébénisterie et à la menuiserie fine, car il est à la fois dur et résistant à l'écrasement, souvent utilisé pour concevoir des meubles et des objets décoratifs, tels que des tables, des boîtes et des pièces artistiques (**Zahir et al., 2020**). En outre, il est couramment utilisé comme bois de chauffage (**Boudy, 1950**). Le bois de service, sous forme de perches et perchettes, sert principalement à la construction de toitures en milieu rural et à des usages agricoles, tandis que le bois de feu est utilisé comme combustible. Les madriers et les loupes sont, quant à eux, réservés à la création d'objets artisanaux.

La résine de *Tetraclinis articulata* entre dans la composition de la peinture (**Rhattas et al., 2016**). Ses branches et cônes sont transformés en couronnes décoratives, pots-pourris et sachets parfumés. Ses branches et cônes sont employés pour concevoir des couronnes décoratives, pots-pourris et sachets parfumés.

### I.7.2. Médecine traditionnelle

Le thuya de Berbérie, appelé l'arbre de vie au XVIIe siècle en raison des propriétés médicinales de sa résine balsamique, est couramment utilisé dans la médecine traditionnelle pour traiter diverses affections. L'extrait de cette résine est réputé pour stimuler la tension artérielle et abaisser la fièvre, tandis que son feuillage exhale une odeur boisée (**Ayache, 2007**). Les différentes parties du *Tetraclinis articulata*, notamment les feuilles et les rameaux, sont utilisées en médecine populaire pour leurs vertus thérapeutiques.

Elles sont efficaces contre les infections de l'intestin, les problèmes respiratoires, les troubles digestifs, le diabète, la tension artérielle et la fièvre chez les enfants (**Bourkhiss et al., 2010b**). L'huile de thuya est également un composant clé de nombreux remèdes, notamment pour traiter les rhumes.

En outre, une décoction de feuilles est utilisée pour soulager les douleurs gastro-intestinales et pour soigner les contusions et les blessures (**Salhi et al., 2010; Djouahri et Boudarene, 2012**). Dans la médecine traditionnelle marocaine, le thuya est également prescrit comme émétique et anti-diarrhéique, ainsi que pour traiter les vertiges, la fièvre et les inflammations oculaires (**Bellakhdar, 1997**).

### **I.7.3. Ecologie**

Le *Tetraclinis articulata* joue un rôle écologique essentiel en raison de sa capacité à produire des rejets de souches, ce qui lui permet de résister aux incendies. Son système racinaire robuste stabilise les sols et réduit ainsi l'érosion. Cette espèce est particulièrement vigoureuse et peut s'adapter à différents types de substrats. En raison de ces atouts, elle est utilisée dans des projets de défense et de restauration des sols, notamment sur des pentes abruptes, où son système racinaire pivotant lui permet de s'ancrer solidement (**Ayache, 2007**). Le thuya a un rôle crucial dans la protection des sols contre l'érosion. De plus, ses branches, une fois récoltées et distillées, fournissent une huile essentielle utilisée pour repousser les papillons de nuit.

Ce bois est également précieux pour les reboisements sur des terrains dégradés, car il s'adapte aux conditions climatiques sèches et arides. Très rustique, il présente l'avantage de rejeter des souches, facilitant ainsi sa régénération naturelle (**Boudy, 1952**).

### **I.7.4. Economie et industrie**

Le thuya de Berbérie représente une ressource naturelle d'une grande valeur économique, contribuant de manière significative à l'artisanat, à l'industrie du bois, à la production pharmaceutique et vétérinaire.

Ainsi, Le goudron végétal, extrait par distillation des racines et du collet de *Tetraclinis articulata*, est couramment utilisé pour traiter diverses affections du bétail (**Benabid, 1976**).

La gomme sandaraque, quant à elle, est couramment utilisée dans la production de laques et de vernis, tandis que des quantités plus réduites sont utilisées dans l'industrie de la parfumerie **(Benabid, 1977)**.

## II. Les huiles essentielles

### II.1. Introduction

Au Moyen Âge, la distillation était généralement utilisée pour la purification de l'eau. À cette époque, lorsque des huiles essentielles apparaissaient à la surface de l'eau, elles étaient souvent considérées comme des sous-produits indésirables. Cependant, la première description authentique des huiles essentielles est attribuée à Catalm Arnold, un médecin de cette époque. Il a été le premier à reconnaître et à documenter la nature et les applications de ces substances aromatiques. Cette découverte a constitué un tournant majeur dans la compréhension et l'utilisation des huiles essentielles, tant dans le domaine médical que dans d'autres aspects de la vie quotidienne. Grâce à ce travail pionnier, les propriétés bénéfiques des huiles essentielles ont commencé à être davantage explorées, ouvrant la voie à leur utilisation dans divers traitements et pratiques de bien-être **(Dridi, 2005)**.

Les huiles essentielles remplissent plusieurs fonctions essentielles, notamment en ajoutant parfum et saveur aux plantes. Elles jouent un rôle important dans la communication des plantes, attirant les pollinisateurs et repoussant les nuisibles. En outre, elles peuvent servir de signaux pour d'autres plantes de la même espèce **(Żukowska et Durczyńska, 2024)**.

Les plantes aromatiques et leurs extraits sont largement reconnus pour leurs propriétés antiseptiques, bactéricides, fongicides, antivirales et médicinales. Historiquement, elles ont été utilisées dans des domaines variés tels que l'embaumement, les rituels religieux, la conservation alimentaire, et comme insecticides en agriculture. Leur efficacité comme agents antimicrobiens, antispasmodiques, sédatifs, anesthésiques topiques et anticancéreux reste pertinente aujourd'hui, avec des recherches récentes qui ont permis de mieux comprendre leurs mécanismes d'action.

Avec un intérêt croissant pour les méthodes de guérison naturelles et le retour aux pratiques de médecine traditionnelle, les huiles essentielles représentent une source prometteuse pour le traitement de maladies courantes. Ces études pourraient également conduire à la découverte de nouveaux médicaments antimicrobiens, antiviraux et anticancéreux (**Żukowska et Durczyńska, 2024**).

## II.2. Définition de l'huile essentielle

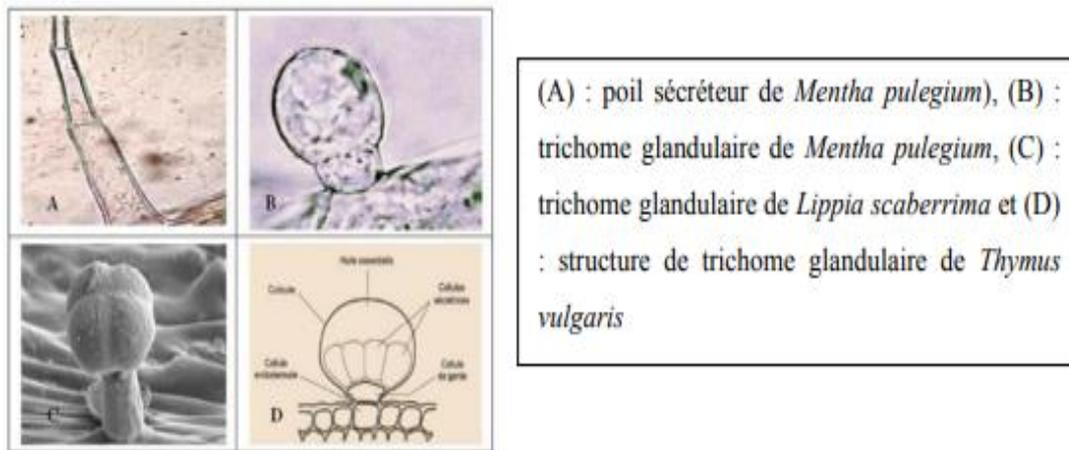
Plusieurs définitions d'une huile essentielle existent, mais toutes conviennent, qu'il s'agit d'un produit extrait d'une matière première d'origine végétale, obtenu par séparation de la phase aqueuse à l'aide de procédés physiques (**Bencheikh, 2017**), elle se distingue par son odeur, qui est spécifique des plantes ou des parties végétales dont elles sont extraites.

Les huiles essentielles sont des substances chimiques qui servent de messagers pour plantes aromatiques permettant une interaction avec leur environnement. Elle contribue à protéger les plantes en éloignant les maladies et les parasites ainsi offrant une barrière protectrice contre les rayonnements solaires (**Ouis, 2015**).

## II.3. Répartition et localisation

En théorie, toutes les plantes sont capables de générer des composés volatils. Cependant, parmi toutes les espèces végétales, seulement 10 % sont classées comme « aromatiques ». La capacité à concentrer des huiles essentielles est une particularité de certaines familles de plantes dans le règne végétal. Cela englobe aussi bien des gymnospermes, telles que les *Cupressaceae* (bois de cèdre) et les *Pinaceae* (pins et sapins), que des angiospermes (**Boukhatem et al., 2019**).

Elles peuvent être extraites à partir de différentes parties des plantes : fleurs, écorces, racines, rhizomes, fruits, bois, etc. Ces substances peuvent être présentes dans plusieurs parties d'une plante avec une composition variable. Elles sont produites dans le cytoplasme des cellules sécrétrices et s'accumulent souvent dans des cellules glandulaires spécialisées en leur surface, recouverte d'une cuticule. Elles peuvent être stockées dans des cellules transformées en poils glandulaires, des poches sécrétrices ou des canaux sécréteurs (**fig 2**) (**Bouras, 2018**).



**Figure 2** : Diversité des structures de sécrétion des huiles essentielles  
(Laiche et Mecheri, 2023)

## II.4. Les voies de Biosynthèse

La biosynthèse des composants des huiles essentielles s'effectue principalement par deux voies : la voie de synthèse des terpénoïdes et la voie des phénylpropanoïdes

### II.4.1. Voie de synthèse des terpénoïdes

L'IPP (isopentylpyrophosphate) est une molécule à cinq atomes de carbone, dérivée de l'acétyl-CoA, lui-même issu du PEP (phosphoénolpyruvate) provenant du fructose. La formation des squelettes hydrocarbonés se fait par l'assemblage "tête à queue" d'unités isopréniques, qui sont des structures pentacarbonées. Cela permet de créer des squelettes de différentes tailles : monoterpènes (10 carbones), sesquiterpènes (15 carbones) et, plus rarement, diterpènes (20 carbones). Ce processus peut également diverger vers d'autres voies métaboliques (Bencheikh, 2017).

### II.4.2. Voie de synthèse des phénylpropanoïdes ou voie de l'acide shikimique

La biosynthèse des phénylpropanoïdes commence par la formation de l'acide shikimique à partir de la condensation aldolique du phosphoénolpyruvate (PEP) et de l'érythrose-4-phosphate. Cet acide est ensuite converti en acide chorismique, qui est crucial pour ce métabolisme. Plusieurs réactions enzymatiques suivent, notamment le réarrangement de l'acide chorismique en acide préphénique, qui subit ensuite une décarboxylation et une déshydratation pour donner l'acide phénylpyruvique.

Cet acide est enfin transformé en acide cinnamique, à partir duquel divers métabolites terminaux sont synthétisés, incluant phénols, acides phénoliques, coumarines, lignanes, flavonoïdes, anthocyanosides et tanins, des composés essentiels pour les plantes (Nebie, 2023).

## II.5. Composition chimique des huiles essentielles

En règle générale, les huiles essentielles ne représentent qu'une petite fraction de la plante, soit moins de 5 % de la matière végétale sèche. Elles sont principalement composées d'hydrocarbures terpéniques (isoprènes) et de terpènes oxygénés. Les monoterpènes, qui contiennent 10 atomes de carbone, constituent plus de 80 % de la composition des huiles essentielles et peuvent présenter diverses structures. Parmi les terpènes oxygénés, on trouve des dérivés tels que les aldéhydes, les alcools et les esters. Certaines huiles essentielles, comme celles provenant de Sassafras ou de clou de girofle, comprennent également des phénylpropanoïdes (Boukroufa, 2016).

### II.5.1. Isoprenoïde

Les isoprénoïdes, ou terpènes, se forment par l'assemblage d'unités d'isoprène. Ils sont classés selon le nombre d'unités d'isoprène: hémiterpènes (C5), monoterpènes (C10), sesquiterpènes (C15) et diterpènes (C20). Leur structure peut être cyclique ou linéaire, influençant leurs propriétés fonctionnelles. Le terme terpénoïdes désigne les isoprénoïdes avec oxygène. Certains composés des huiles essentielles proviennent de la dégradation de structures plus grandes, tandis que les norisoprénoïdes résultent de la dégradation de triterpénoïdes ou tétraterpénoïdes (Dajic Stevanovic et al., 2020).

### II.5.2. Phénylpropanoïde

La structure fondamentale des dérivés du shikimate se compose d'une unité C6–C3, où le cycle benzénique (C6) est généralement associé à une chaîne latérale de trois carbones (C3) en position 1, avec des oxygènes en troisième, quatrième ou cinquième position. Le C3 inclut souvent une double liaison entre deux carbones, bien que la chaîne latérale puisse également être réduite à un seul carbone (C1). Les phénols ou éthers de phénol, qui sont des phénylpropanoïdes, se retrouvent fréquemment dans les huiles essentielles (Dajic Stevanovic et al., 2020).

### II.5.3. Dérivés de polycétides et de lipides

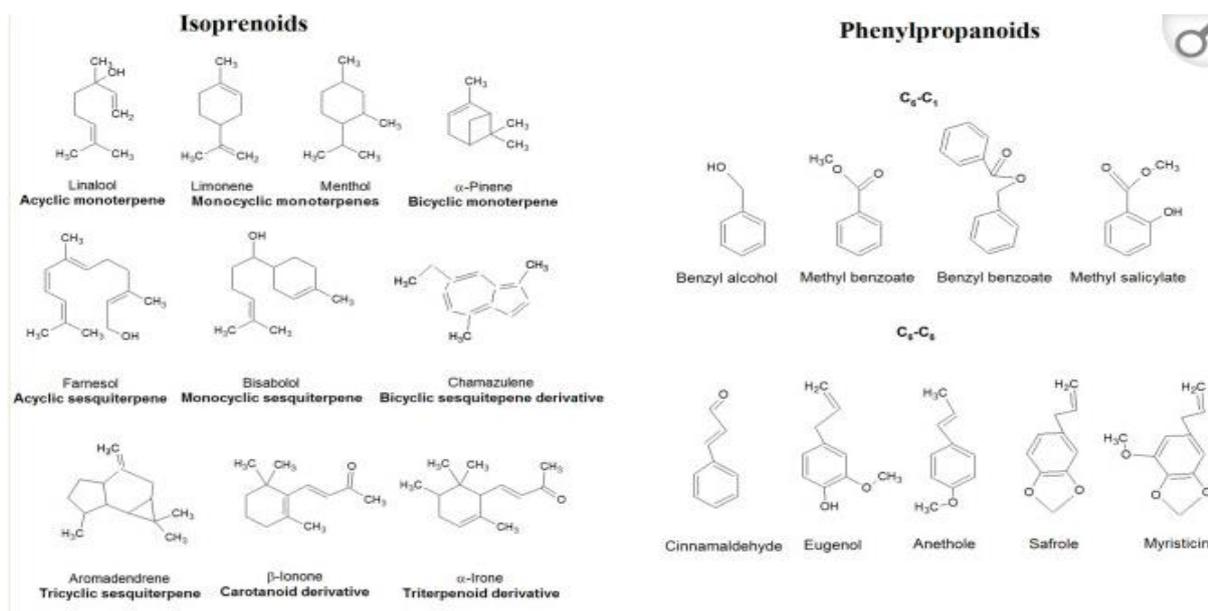
Les dérivés d'acides gras présents dans les huiles essentielles se forment par des réactions de condensation de polycétides, par la dégradation de lipides ou par la cyclisation de l'acide arachidonique. La condensation de polycétides aboutit à la formation de cycles phénoliques, qui subissent une oxydation sur des atomes de carbone alternés, ce qui peut donner des acides, des cétones, des phénols ou une extrémité avec une double liaison.

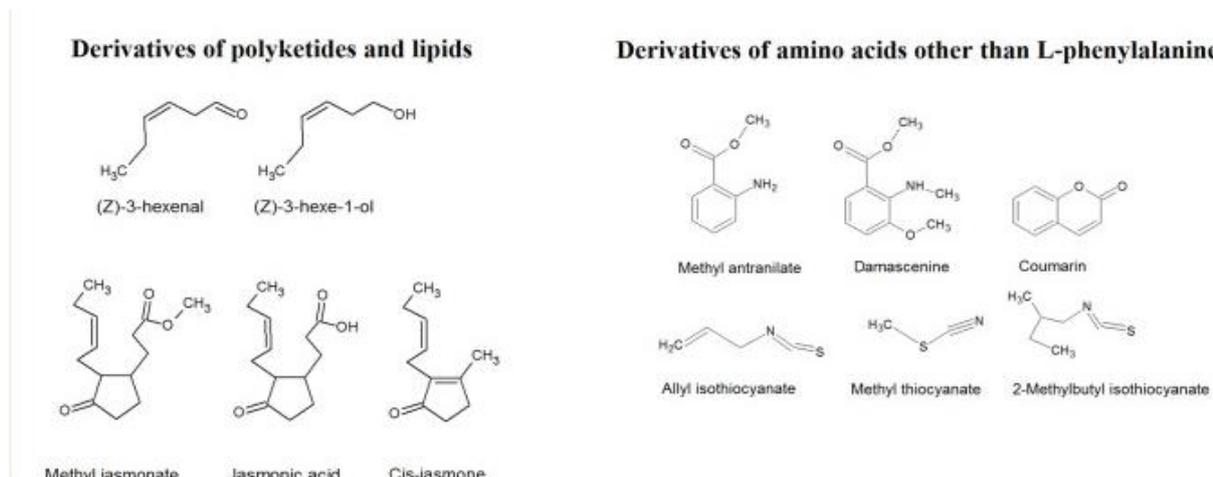
Les diverses réactions enzymatiques sur les acides gras, comme le clivage, l'oxydation, la lactonisation, la réduction ou l'élimination, mènent à la création de lactones, d'alcools ou d'aldéhydes à chaîne courte. Par ailleurs, la cyclisation de l'acide arachidonique produit des prostaglandines et des jasmonates (Dajic Stevanovic et al., 2020).

### II.5.4. Dérivés d'acides aminés autres que L-phénylalanine

Les acides aminés, tels que l'alanine, la valine, la leucine, l'isoleucine et la méthionine, sont des précurseurs importants pour la formation d'aldéhydes, d'alcools, d'esters, d'acides et de composés azotés et soufrés dans les huiles essentielles. Bien que les composés soufrés et hétérocycliques contenant de l'azote ou de l'oxygène soient présents en quantité limitée, ils ont des structures simples et dégagent des odeurs caractéristiques ou piquantes (Dajic Stevanovic et al., 2020).

Quelques exemples des principaux groupes de constituants des huiles essentielles sont présentés dans la figure 3.





**Figure 3 :** Principaux groupes de constituants des huiles essentielles  
(Dajic Stevanovic *et al.*, 2020)

## II.6. Méthodes d'identification chimique

### II.6.1. Chromatographie en phase gazeuse (CPG)

La chromatographie en phase gazeuse (CPG) est une méthode d'analyse qui permet de séparer et d'identifier les composés gazeux ou qui peuvent être vaporisés par chauffage sans décomposition. Elle est largement utilisée pour l'analyse de la composition chimique des huiles essentielles, car elle permet de détecter et d'individualiser les constituants à partir d'échantillons de petite taille, allant jusqu'à un millilitre ou même un microlitre (Bouras, 2018).

Les avancées technologiques dans le domaine des colonnes capillaires, des phases stationnaires et des détecteurs à ionisation de flamme (FID) ont considérablement amélioré la chromatographie en phase gazeuse (CPG), en faisant d'elle une technique incontournable pour l'analyse des huiles essentielles (Bouras, 2018).

Les constituants des huiles essentielles sont caractérisés par des indices qui sont calculés à partir d'une série d'alcanes ou d'esters méthyliques linéaires, sous les mêmes conditions d'analyse des échantillons. Cela permet de déterminer l'identité des composés présents dans les échantillons. Deux méthodes sont utilisées pour caractériser les composés : l'indice de Kováts, qui est calculé à partir de la relation entre les temps de rétention des alcanes et des composés analysés, et les indices de rétention, qui sont déterminés par la programmation de température. Cependant, il est important de noter que les temps de rétention peuvent varier d'une analyse à l'autre, notamment en raison du vieillissement des colonnes capillaires (**Bouras, 2018**).

### **II.6.2. Chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GPC/SM)**

Le couplage chromatographie en phase gazeuse/spectrométrie de masse (CPG/SM) est la technique de référence pour l'analyse des huiles essentielles. Introduite en 1960, cette méthode associe la chromatographie en phase gazeuse à la spectrométrie de masse, permettant ainsi une analyse plus riche. Son principe repose sur le transfert de composés séparés vers le spectromètre de masse via un gaz vecteur. Ces composés y sont fragmentés en ions de masses variées, qui sont ensuite séparés en fonction de leur masse. L'identification d'un pic inconnu se fait par comparaison de son spectre avec des bases de données de référence, sous réserve que les spectres soient suffisamment similaires et que les indices de rétention soient conformes (**Zaibet, 2018**).

## **II.7. Techniques d'extraction des huiles essentielles**

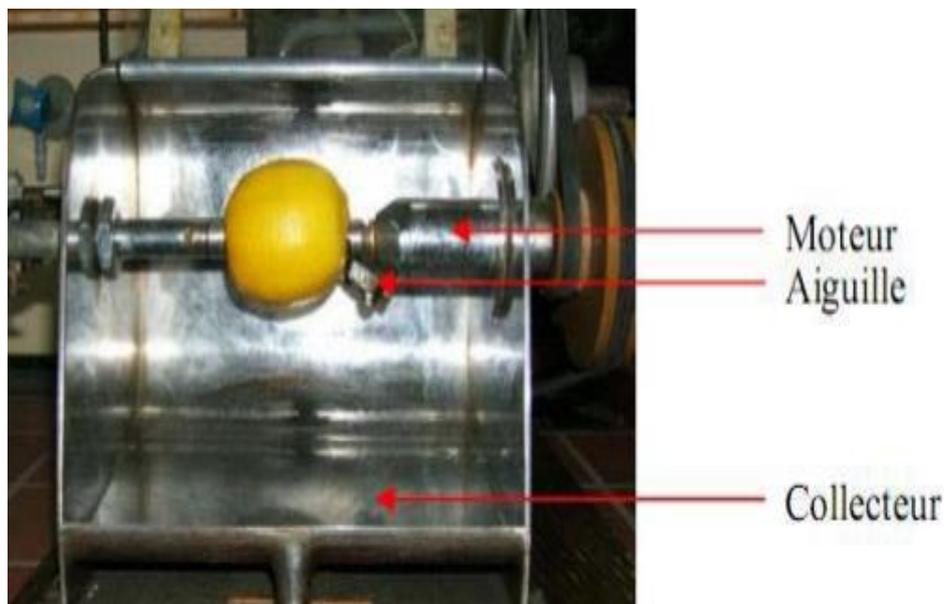
Le choix de la technique d'exploitation des plantes aromatiques dépend de la nature spécifique des composés recherchés, indépendamment du type d'organe utilisé. Les plantes aromatiques peuvent être traitées par différents modes d'extraction, tels que l'entraînement à la vapeur d'eau, l'hydrodistillation, l'extraction avec un solvant volatil ou un fluide à l'état supercritique. La méthode d'extraction à adopter dépend du type de produit souhaité et de la nature chimique des molécules recherchées. Cela dit, le choix de la technique d'extraction dépend de la nature chimique des molécules recherchées et du type de produit souhaité, et non pas du type d'organe utilisé (**Boutekedjiret, 1999**).

### **II.7.1. Extraction par expression à froid**

L'expression à froid est une technique qui a vu le jour en Sicile et en Calabre, avant d'être adoptée par tous les pays producteurs d'agrumes. Cette méthode d'extraction est spécialement conçue pour les agrumes en raison de la localisation de leurs huiles essentielles.

Elle implique de déchirer les péricarpes, communément appelés « zestes » ou flavedo, afin de libérer les essences aromatiques présentes dans les sacs oléifères sous l'écorce du fruit. Par la suite, l'huile essentielle est entraînée par de l'eau, puis un processus de décantation est réalisé pour en assurer la séparation (**Boukroufa, 2016**).

La figure 4 illustre bien le montage de l'extraction par la pression à froid.



**Figure 4** : Schéma du montage de l'extraction par la pression à froid  
(**Bouras, 2018**)

### II.7.2. Extraction par enfleurage

Depuis l'antiquité, les graisses concrètes et les huiles ont été utilisées pour absorber les odeurs de plantes. Cette méthode simple a permis l'exploitation des arômes pendant des centaines d'années. Aujourd'hui, ce procédé est réservé aux végétaux fragiles comme les fleurs de jasmin ou de violette. Pour procéder, on dispose les fleurs sur des châssis de verre recouverts de bois enduits de graisse concrète. Les fleurs sont renouvelées à intervalles réguliers (tous les 3, 5 ou 7 jours) pendant 60 jours. Les graisses parfumées sont ensuite traitées à l'alcool pour obtenir des pommades, qui peuvent être utilisées à des fins cosmétiques ou épuisées pour la parfumerie.

Il existe deux types d'enfleurage : l'enfleurage à froid, utilisé pour les fleurs très délicates comme le jasmin et les violettes, et l'enfleurage à chaud, employé pour les plantes moins fragiles telles l'iris et les jonquilles. Pour l'enfleurage à chaud, la graisse est chauffée à une température de 60° à 70°C. Cependant, l'enfleurage est une technique relativement rare car elle est très coûteuse (Nourachani, 2010).

### II.7.3. Extraction par solvant organique volatile

L'extraction par solvant volatil est la méthode la plus couramment utilisée pour isoler des substances à partir de matrices végétales. Cette technique consiste à extraire les composants de la matière végétale, généralement à température ambiante, en recourant à un solvant volatil. Elle peut être réalisée de manière discontinue, par le biais de la macération, ou en continu, grâce à un renouvellement constant du solvant.

Une variété de solvants est employée dans les différentes méthodes d'extraction des composés bioactifs, parmi lesquels on trouve : l'acétone, l'éthanol, le tétra-hydro-furane (THF), l'hexane, le toluène, l'éther diéthylique, le méthanol, l'acétate d'éthyle, le dichlorométhane, l'éther de pétrole, le chloroforme et le butanol. Des mélanges de solvants, notamment des combinaisons hydro-alcooliques, sont également utilisés pour extraire les polyphénols.

Outre la macération, qui est la méthode traditionnelle, plusieurs autres techniques sont également mises en œuvre pour l'extraction à l'aide de solvants volatils (Boukroufa, 2016).

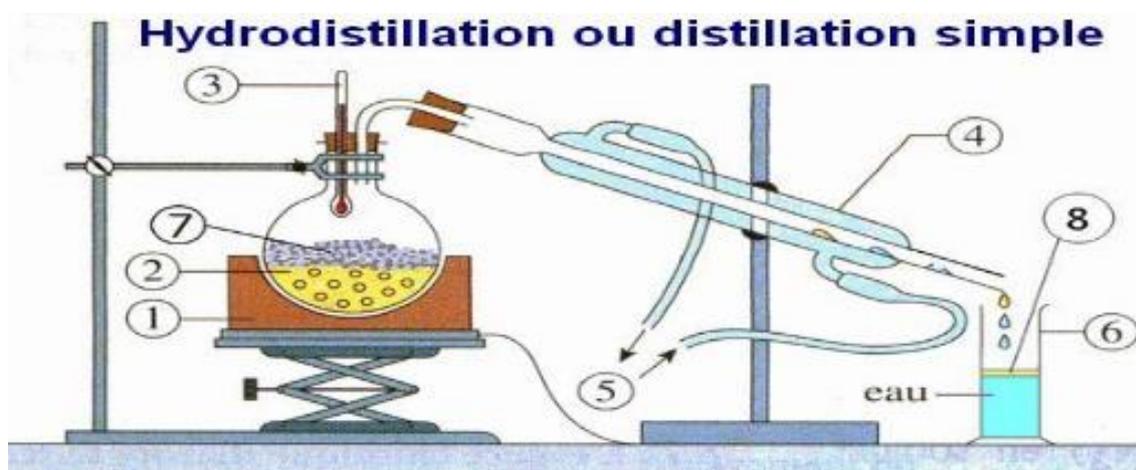
### II.7.4. Hydrodistillation

Le principe de l'hydrodistillation, également connu sous le nom de méthode de Moritz, repose sur la distillation de mélanges binaires non miscibles, principalement utilisée pour l'extraction des huiles essentielles. Cette technique consiste à immerger la biomasse végétale dans un alambic rempli d'eau, lequel est chauffé jusqu'à ébullition (fig 5).

Lorsque l'eau atteint sa température d'ébullition, la vapeur d'eau formée détruit la structure des cellules végétales, permettant ainsi la libération des molécules volatiles, y compris les substances aromatiques. La vapeur, chargée de ces composés, se sépare du substrat cellulosique et est dirigée vers un serpentín où elle se condense. Le mélange condensé est ensuite récupéré dans un récipient appelé essencier, conçu pour la décantation des huiles essentielles.

Dans ce processus, les éléments insolubles dans l'eau se décantent pour former une couche d'huile essentielle qui surnage à la surface. La partie soluble dans l'eau est désignée comme eau de distillation ou hydrolat, contenant divers composés hydrosolubles extraits durant l'hydrodistillation.

Cette méthode est largement utilisée dans l'industrie pour extraire des huiles essentielles de différentes plantes et est essentielle dans la production de parfums, d'arômes et de produits cosmétiques, contribuant ainsi à divers aspects de l'odeur et de la saveur dans de nombreux produits (Bencheikh, 2017).

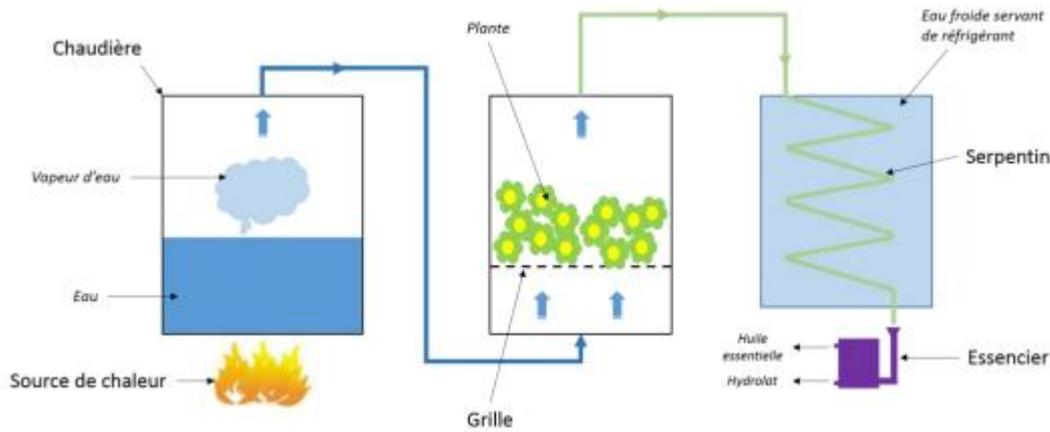


**Figure 5 :** Schéma du montage de l'extraction par hydrodistillation (Bencheikh, 2017)

### II.7.5. Distillation par entraînement à la vapeur

La méthode la plus courante pour extraire des huiles essentielles consiste à utiliser un alambic où une partie de la plante est immergée dans de l'eau bouillante. Les vapeurs traversent la plante, libérant ainsi les molécules aromatiques volatiles, qui sont ensuite condensées. L'huile essentielle flotte sur l'eau en raison de sa différence de densité. Bien que simple et économique, cette méthode comporte le risque d'altérer les molécules aromatiques si le temps de chauffage est trop long. Pour une bonne qualité d'huile essentielle, il est essentiel de limiter la durée du processus (Barros, 2019).

Le schéma de cette méthode est démontré dans la figure 6.



**Figure 6 :** Schéma d'une installation d'entraînement à la vapeur  
(Deschepper, 2017)

### II.7.6. Extraction par ultrason

L'extraction assistée par ultrasons s'appuie sur le phénomène de cavitation, qui se produit lorsqu'une onde ultrasonique génère des bulles de gaz. À l'implosion de ces bulles, des micro-jets sont créés, provoquant des dommages aux glandes lipidiques des cellules végétales. Ce phénomène favorise le transfert de masse entre la cellule et le solvant, ce qui permet de libérer l'huile essentielle contenue dans ces cellules. Une fois l'extraction réalisée, il est nécessaire de retirer le solvant utilisé afin de récupérer l'huile essentielle purifiée. Cette méthode a prouvé son efficacité en augmentant les rendements d'extraction tout en diminuant la consommation d'énergie et d'eau. De plus, elle aide à minimiser la dégradation thermique qui pourrait survenir à cause des températures élevées et des longues durées d'extraction (Nebie, 2023).

La figure 7 démontre le dispositif d'extraction par ultrasons.

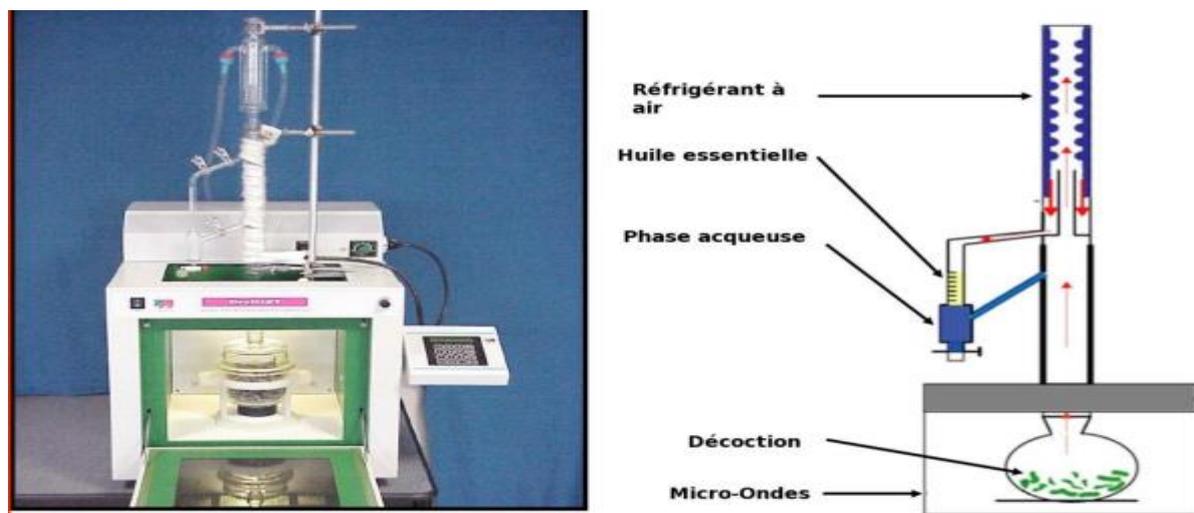


**Figure 7 :** Dispositif d'extraction d'huile essentielle par ultrasons  
(Nebie, 2023)

### II.7.7. Extraction par micro-onde

L'utilisation des micro-ondes pour l'extraction des huiles essentielles a été développée dans les années 1990 via une méthode d'hydrodistillation à vide. Cette technique permet de chauffer la matière végétale dans une enceinte hermétique, entraînant les molécules volatiles par la vapeur d'eau générée. Elle réduit significativement le temps d'extraction, de 5 à 10 fois par rapport aux méthodes classiques, permettant d'extraire l'huile de 2 kg de menthe poivrée en seulement quinze minutes, contre deux heures précédemment (**fig 8**).

Aujourd'hui, des méthodes hybrides d'extraction assistées par micro-ondes émergent, offrant une extraction encore plus rapide et un léger gain de rendement, tout en préservant la composition chimique des huiles essentielles. Cette approche répond également à une exigence croissante de durabilité, car elle ne nécessite pas de solvants chimiques et est économe en énergie. En raison de la qualité des huiles essentielles obtenues et des résultats prometteurs pour une application industrielle, l'extraction par micro-ondes s'avère être une alternative avantageuse aux méthodes traditionnelles (**Deschepper, 2017**).



**Figure 8** : Schéma du montage de l'extraction par micro-onde  
(**Bencheikh, 2017**)

### II.7.8. Extraction par CO<sub>2</sub> supercritique

La technique d'extraction par fluide supercritique, notamment à l'aide de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), se distingue par son efficacité et son aspect écologique. En contrôlant rigoureusement la température et la pression, le CO<sub>2</sub> est porté à un état supercritique, ce qui lui permet d'adopter des propriétés intermédiaires entre celles d'un gaz et d'un liquide. Cela optimise sa capacité à solubiliser de nombreux composés aromatiques.

Le dioxyde de carbone est particulièrement apprécié dans cette méthode en raison de ses multiples avantages. Sa pression critique de 73,8 bars et sa température critique de 31,1 °C en font un solvant facile à manipuler. De plus, le CO<sub>2</sub> est inerte, ininflammable, non toxique, facile à éliminer après l'extraction et relativement abordable, ce qui renforce son attrait pour les industries de l'extraction. Sa capacité à sélectionner certains composants lors de l'extraction fait de lui un choix de prédilection pour obtenir des extraits purs.

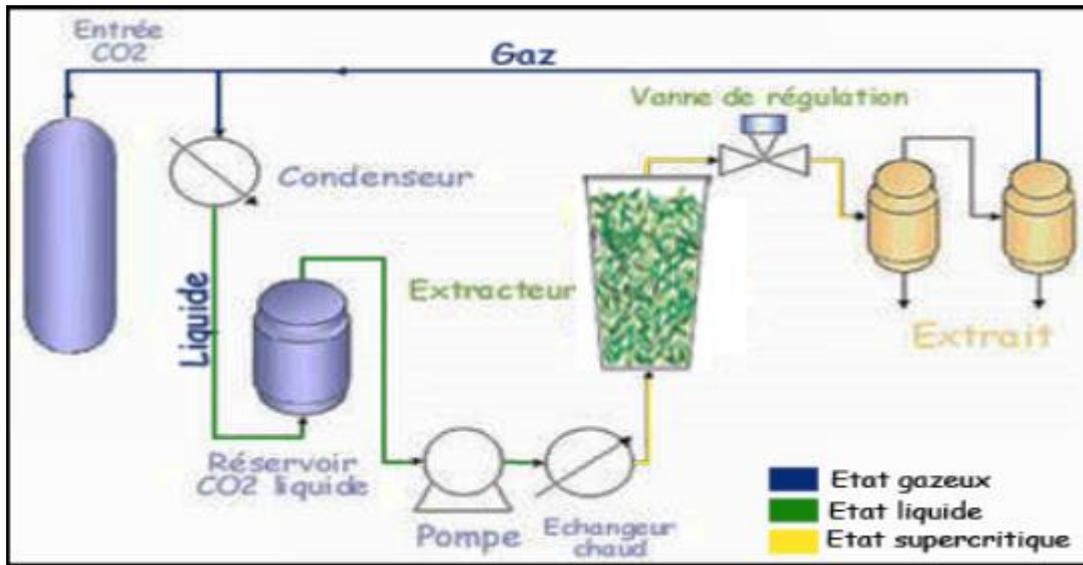
Le processus débute avec le placement de la matière végétale dans un autoclave où elle entre en contact avec le CO<sub>2</sub> supercritique. Ce dernier s'infiltré dans les cellules végétales, capturant les composés aromatiques. Ensuite, dans un séparateur, le CO<sub>2</sub> redevient gazeux, permettant une séparation complète de l'huile essentielle obtenue.

L'extraction par fluide supercritique est souvent qualifiée de méthode "verte" en raison de son faible besoin en solvants organiques et de sa rapidité par rapport aux techniques de distillation conventionnelles. De plus, elle préserve mieux les composés thermolabiles, entraînant des variations qualitatives et quantitatives dans les huiles essentielles produites par rapport à celles issues de l'hydrodistillation.

Un aspect à considérer est que le CO<sub>2</sub>, étant apolaire, tend à extraire principalement des molécules également apolaires. Cependant, à des pressions plus élevées, sa polarité augmente, lui permettant d'extraire également des composés polaires. Cela signifie que l'huile essentielle résultante peut contenir une majorité de terpènes, qu'ils soient hydrocarbonés ou oxygénés.

En conclusion, l'extraction par CO<sub>2</sub> supercritique se révèle être une technique novatrice et durable pour obtenir des huiles essentielles de haute qualité, tout en préservant les propriétés précieuses des composés volatils. Cela en fait une méthode de choix pour les applications dans les domaines des cosmétiques, des parfums et des arômes (Nebie, 2023).

La figure 9 nous montre le dispositif nécessaire à l'extraction par CO<sub>2</sub> supercritique



**Figure 9** : Schéma du montage de l'extraction par CO<sub>2</sub> supercritique  
(Bouras, 2018)

## II.8. Activités biologiques des huiles essentielles

Le rôle physiologique des huiles essentielles au sein des plantes demeure encore mal défini. Toutefois, la richesse moléculaire des métabolites qu'elles contiennent leur attribue une gamme de fonctions et de propriétés biologiques variées (Toure, 2015).

### II.8.1. Activité antibactérienne

Les huiles essentielles provenant majoritairement des Lamiaceae telles que l'origan, le thym, la sauge, le romarin et le clou de girofle, ont suscité un intérêt particulier en raison de leurs propriétés antibactériennes. Ces plantes aromatiques, souvent intégrées dans la cuisine, sont riches en composés phénoliques, notamment l'eugénol, le thymol et le carvacrol. Ces composés sont reconnus pour leur forte activité antibactérienne, étant efficaces contre un large éventail de bactéries pathogènes comme *Escherichia coli*, *Bacillus cereus*, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella enterica*, *Clostridium jejuni*, *Lactobacillus sakei*, *Staphylococcus aureus* et *Helicobacter pylori*.

L'efficacité de ces huiles essentielles agit comme conservateur pour les aliments et comme agents antimicrobiens dans divers domaines, ce qui pourrait avoir des implications significatives pour la sécurité alimentaire et la santé publique (Bounab, 2020).

Leur efficacité antibactérienne repose non pas sur un unique mécanisme, mais sur une série d'interactions complexes à différents niveaux. Chaque composé actif peut adopter un mode d'action particulier. De manière générale, l'action des huiles essentielles s'effectue en trois étapes en attaquant la membrane bactérienne qui augmente sa perméabilité, l'acidification du cytoplasme perturbant la production d'énergie cellulaire ainsi que la synthèse de ses constituants et la destruction du matériel génétique qui en suite, entraîne la mort de la bactérie (**Bounab, 2020**).

### **II.8.2. Activité antivirale**

Les huiles essentielles, notamment celles d'eucalyptus, de clou de girofle, de citron, d'origan et de thym, ont montré des effets antiviraux prometteurs contre plusieurs virus, tels que ceux de la grippe et de l'herpès. Ces huiles pourraient servir de base pour le développement de nouveaux médicaments antiviraux, en particulier pour les infections causées par des virus enveloppés comme le SARS-CoV-2.

Des études ont révélé que les huiles essentielles peuvent endommager les enveloppes virales et que certains composants, comme l'acide shikimique, sont déjà utilisés dans des traitements antiviraux comme l'oseltamivir. Les huiles riches en phénols, alcools et aldéhydes, comme celles de thym et d'origan, présentent les effets les plus forts. Les mécanismes d'action incluent l'inactivation virale, l'inhibition de l'adsorption et la perturbation de la réplication virale.

Cependant, bien que prometteuses, les recherches *in vitro* nécessitent encore des études cliniques pour confirmer l'efficacité et la sécurité des huiles essentielles dans le traitement des infections virales, les données actuelles ne permettant pas de les recommander comme traitement standard (**Żukowska et Durczyńska, 2024**).

### **II.8.3. Activité antifongique**

Les infections fongiques constituent un problème de santé croissant, en partie à cause de l'utilisation excessive des antibiotiques. Bien que certains agents antibactériens montrent également une activité antifongique, les traitements antifongiques nécessitent généralement plus de temps. Parmi les huiles essentielles reconnues pour leurs propriétés antifongiques, on trouve celles de cannelle, de palmarosa, de clou de girofle et de niaouli, dont l'efficacité est liée à certains groupements fonctionnels.

Les études révèlent que l'effet inhibiteur de ces huiles est dû à la réactivité de la fonction aldéhyde avec des groupes thiol des acides aminés, entraînant des modifications ioniques de la membrane cellulaire. De plus, des composés phénoliques comme l'eugénol et le chavicol montrent une efficacité antifongique supérieure à celle des aldéhydes testés (**Bencheikh, 2017**).

#### **II.8.4. Activité antioxydante**

Les cellules et tissus humains peuvent subir diverses agressions physiques, chimiques et métaboliques, telles que les traumatismes, l'irradiation, l'acidose ou l'exposition à des toxines. Ces agressions entraînent souvent un stress oxydatif, résultant d'une surproduction de radicaux libres dérivés de l'oxygène, d'un processus physiologique qui est habituellement bien régulé (**Toure, 2015**).

Les antioxydants, qu'ils soient naturels ou synthétiques, sont essentiels pour prévenir diverses maladies (cardiovasculaires, neurodégénératives, inflammations, diabète) et ralentir le vieillissement lié aux radicaux libres. Ils sont également utilisés dans l'industrie alimentaire pour éviter la détérioration, le rancissement et la décoloration des produits, causés par l'oxydation due à la lumière, à la chaleur et à certains métaux (**Zaibet, 2018**).

#### **II.9. Toxicité des huiles essentielles**

Les huiles essentielles, bien que de plus en plus populaires en tant que solutions naturelles de soins, comportent des risques de toxicité. Leur usage, même en vente libre, nécessite une vigilance particulière, notamment de la part des pharmaciens, qui doivent s'assurer du bon usage et informer des précautions et contre-indications.

Les principaux types de toxicité liés aux huiles essentielles incluent :

- Hépatotoxicité.
- Dermotoxicité (irritations, brûlures, hypersensibilité, phototoxicité)
- Neurotoxicité (dépression ou excitation du système nerveux, convulsions).
- Néphrotoxicité.
- Effets tératogènes et abortifs.
- Carcinogénicité.
- Hypersensibilité.

Les intoxications aiguës sont rares, souvent dues à des ingestions accidentelles par de jeunes enfants. Cependant, une toxicité chronique peut résulter d'une utilisation prolongée d'huiles essentielles contenant des phénols, nuisibles pour le foie. Certaines huiles, en raison de leur toxicité ou de risques d'usages détournés, sont maintenant soumises au monopole pharmaceutique pour une meilleure régulation (**Deschepper, 2017**).

## **II.10. Utilisation des huiles essentielles**

Autrefois réservées à la parfumerie et à la médecine, les huiles essentielles sont maintenant omniprésentes dans notre vie quotidienne. Elles se retrouvent dans les cosmétiques, les produits d'hygiène, les parfums d'ambiance, ainsi que dans les huiles de massage et les complexes visant à purifier l'air. Leur utilisation s'étend également à l'industrie et à l'agroalimentaire, avec environ 3000 huiles connues, dont 300 ont une valeur commerciale, principalement dans les domaines des parfums et des arômes (**Deschepper, 2017**).

### **II.10.1. En agroalimentaire**

Les huiles essentielles trouvent une application dans tous les domaines de l'agroalimentaire, notamment dans les boissons, les confiseries, les produits laitiers, les viandes, les sauces, les soupes, les snacks et la nutrition animale. Grâce à leurs propriétés antibactériennes et aromatisantes, elles peuvent également être utilisées comme conservateurs alimentaires.

L'utilisation de ces huiles a augmenté ces dernières années, notamment en raison de réglementations de sécurité alimentaire, telles que la recommandation de l'OMS de diminuer la teneur en sel. De plus, le mouvement vers une consommation de produits "naturels" et le goût pour l'exotisme incitent les fabricants à intégrer les huiles essentielles comme additifs aromatisants. Ce retour vers le naturel s'inscrit dans une prise de conscience accrue en faveur de la protection de l'environnement et du développement de l'agriculture biologique, positionnant les huiles essentielles comme un secteur prometteur pour la recherche et l'innovation (**Zaibet, 2018**).

### II.10.2. En agriculture

L'utilisation des huiles essentielles en agriculture est encore à ses débuts, mais elle pourrait se développer grâce à une réglementation propice favorisant les alternatives naturelles aux produits phytosanitaires chimiques. À l'heure actuelle, ces huiles sont examinées pour leur efficacité contre divers nuisibles, y compris les insectes, les champignons, les bactéries, et les adventices, ainsi que pour la conservation des semences.

Certaines huiles essentielles, telles que celle de clou de girofle pour les pommes et les poires, de menthe verte pour inhiber la germination des pommes de terre, et d'orange douce contre diverses maladies et insectes, sont déjà commercialisées dans plusieurs pays européens. Cependant, la complexité des réglementations ralentit l'apparition de nouveaux produits sur le marché, car leur approbation exige la démonstration de leur efficacité et de leur sécurité, conformément aux normes phytopharmaceutiques. De plus, pour être utilisées en agriculture biologique, les huiles essentielles doivent figurer sur une liste positive de produits autorisés (Deschepper, 2017).

### II.10.3. En cosmétologie et parfumerie

C'est l'un des plus grands consommateurs de substances odorantes. En effet, les produits de toilette tels que les parfums, savons, laits, shampooings, pâtes et poudres, et dentifrices, sont évalués en fonction de leur fragrance. Toujours en quête de nouvelles sensations, les industries de la parfumerie et de la cosmétique exploitent largement les substances odorantes volatiles pour créer une gamme de produits de plus en plus variée (Koudou, 2009).

### II.10.4. En Pharmacie

L'industrie pharmaceutique utilise les huiles essentielles dans les antiseptiques externes et profite de leurs propriétés bactériostatiques, bactéricides, antifongiques et protectrices. L'Agence Européenne du Médicament a référencé diverses huiles essentielles pour traiter des pathologies, notamment l'huile d'arbre à thé, efficace pour soigner les plaies superficielles et les inflammations, et l'huile de *Mentha piperita*, utilisée pour les troubles digestifs et les céphalées (Nebie, 2023).

### II.10.5. En industrie

Les huiles essentielles sont déjà largement utilisées dans des applications industrielles en raison des quantités requises et des normes de qualité strictes. Elles font partie de divers produits industriels, des détergents (avec une utilisation prédominante de l'huile essentielle de lavandin dans les lessives et les adoucissants) aux colles, vernis et désinfectants. Par ailleurs, l'industrie chimique s'intéresse à la complexité des mélanges moléculaires des huiles essentielles, qui permettent d'extraire des composés comme le menthol, très utilisé par l'industrie du tabac. Les molécules isolées peuvent également être utilisées comme supports pour des réactions d'hémisynthèse, souvent plus rentables que la synthèse complète de nouvelles molécules **(Deschepper, 2017)**.

## III. Le stress oxydatif

### III.1. Les Origines des ROS et du Stress Oxydatif

En tant que centrales énergétiques de la cellule, les mitochondries consomment environ 90 % de l'oxygène de l'organisme pour générer de l'ATP par phosphorylation oxydative, ce qui en fait une importante source d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) **(Boveris et Chance, 1973)**. Sur la membrane interne des mitochondries, l'anion superoxyde ( $O_2^{\bullet-}$ ) est principalement produit dans les complexes I et III de la chaîne de transport des électrons à la suite de la réduction monoélectronique de l' $O_2$ . Une série de réactions enzymatiques constitue les voies métaboliques pour le traitement des ROS générés endogènement lors de la respiration aérobie **(Kowaltowski et al., 2009)**.

Les ROS sont des molécules chimiquement réactives, hautement toxiques, car elles endommagent diverses macromolécules cellulaires, notamment les lipides, les protéines et les acides nucléiques **(Ma, 2010)**. Cela illustre le prix élevé à payer pour l'utilisation de l'oxygène afin d'optimiser la production d'énergie. En conséquence, les ROS participent à divers processus pathologiques chez presque tous les organismes aérobies **(Alfadda et Sallam, 2012)**.

Le stress oxydatif se définit comme un état physiologique où la production de ROS dépasse la capacité des cellules à les neutraliser efficacement **(Jones, 2006)**. Il joue un rôle majeur dans la perturbation de la fonction cellulaire normale, pouvant entraîner inflammation, lésions tissulaires et dysfonctionnements organiques.

Comme illustré dans la Figure 10, les ROS cellulaires sont principalement produits dans les mitochondries, site intracellulaire clé pour la phosphorylation oxydative. D'autres organites liés à la production de ROS incluent :

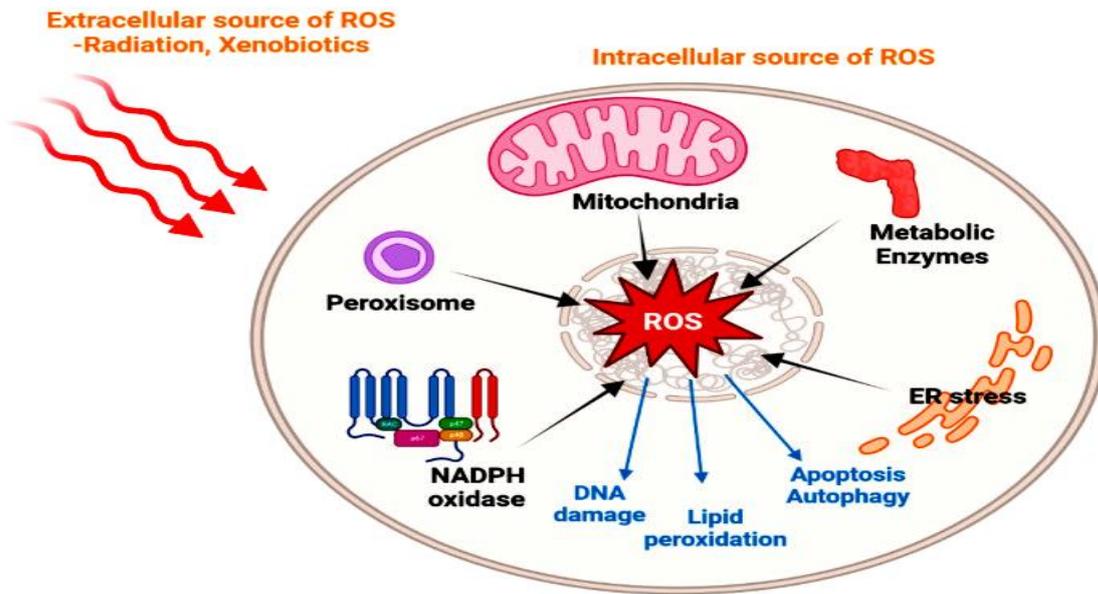
- **Les peroxyosomes**, où plusieurs enzymes peroxysomales génèrent et métabolisent les ROS (del Río et López-Huertas, 2016).
- **Le réticulum endoplasmique**, où l'agrégation de protéines mal repliées conduit à un stress du RE associé à une augmentation des ROS (Bhandary et al., 2013).
- **Les enzymes métaboliques**, telles que les oxydases NADPH (NOX), qui représentent une autre source importante de stress oxydatif (Magnani et Mattevi, 2019).

De plus, une production excessive de ROS peut être induite par une exposition à la lumière solaire ou à des composés xénobiotiques (Klotz et Steinbrenner, 2017 ; Ray et al., 2012).

L'accumulation de ROS entraîne des dommages cellulaires par des réactions directes avec les molécules biologiques ou par une régulation indirecte des voies de signalisation (Schieber et Chandel, 2014).

Cela explique pourquoi le stress oxydatif est impliqué dans la progression du cancer, favorisant les mutations de l'ADN et modifiant les voies de signalisation cellulaire (Reuter et al., 2010). De même, il joue un rôle dans le vieillissement, l'accumulation de dommages oxydatifs au fil du temps contribuant au déclin des fonctions cellulaires et à l'apparition de maladies liées à l'âge.

Ainsi, comprendre et gérer le stress oxydatif représente un défi majeur pour la biomédecine.



**Figure 10** : Schéma du stress oxydatif et de ses sources intracellulaires et extracellulaires  
(Hong *et al.*, 2024)

### III.2. Balance des ROS intracellulaires et systèmes antioxydants

En raison de la haute toxicité et de l'effet carcinogène des ROS, le maintien de leur niveau dans des limites bien définies est un aspect crucial de la physiologie cellulaire, avec des implications profondes pour la santé et les maladies. Plusieurs voies de régulation redox basées sur les ROS contrôlent l'homéostasie intracellulaire des ROS, l'oxydation des résidus de cystéine étant l'un des mécanismes les plus largement étudiés (D'Autréaux et Toledano, 2007). Les résidus de cystéine servent de cibles spécifiques pour les ROS et constituent les centres catalytiques de nombreuses protéines scavengers des ROS, telles que les peroxydases thiol. Par exemple, les peroxyrédoxines (Prxs) contiennent des résidus de cystéine conservés dans leurs sites catalytiques, qui sont sensibles à l'oxydation par le  $H_2O_2$ .

Lorsqu'elles sont exposées au  $H_2O_2$ , les résidus cystéine peroxydatiques des Prxs subissent une oxydation, formant un intermédiaire acide sulfinique. Des réactions réversibles ultérieures avec des résidus cystéine "résolvants" au sein de la même unité ou des sous-unités voisines de Prx entraînent la formation de ponts disulfures ou de niveaux d'oxydation plus élevés. Ces modifications oxydatives peuvent altérer l'activité et l'état oligomérique des Prxs, modifiant ainsi leur activité peroxydase et leur interaction avec les molécules de signalisation en aval (Ray *et al.*, 2012). De plus, une autre modification oxydative importante concerne les résidus de méthionine.

Lorsqu'ils sont exposés aux ROS, la majorité des résidus de méthionine sont convertis en méthionine sulfoxides, entraînant des modifications structurales et fonctionnelles des protéines (Ezraty et al., 2005). Grâce à l'action de la méthionine sulfoxyde réductase, l'oxydation de la méthionine par les ROS devient un processus réversible, protégeant ainsi l'intégrité et la stabilité des protéines contre les dommages oxydatifs.

### III.3. Systèmes antioxydants cellulaires

Les cellules emploient un système multifacette de défense antioxydante pour réguler les niveaux de ROS et prévenir le stress oxydatif. Ce système inclut un réseau d'antioxydants enzymatiques et non enzymatiques qui travaillent en concert pour neutraliser les ROS, comme le démontre la figure 11 (Valko et al., 2006). Les antioxydants enzymatiques sont principalement représentés par des enzymes comme la superoxyde dismutase (SOD) et la catalase (CAT). La SOD constitue la ligne de défense primaire contre les ROS, jouant un rôle clé en catalysant la dismutation des anions superoxyde ( $O_2^{\bullet-}$ ) pour former du  $H_2O_2$  (Okado-Matsumoto et Fridovich, 2001). La détoxification subséquente du  $H_2O_2$  en eau et en oxygène est catalysée par des enzymes telles que la CAT, la glutathion peroxydase (GPx) et les peroxyrédoxines (Prxs) (Vives-Bauza et al., 2007). De plus, les enzymes associées au glutathion, telles que la glutathion réductase (GR) et la glutathion S-transférase (GST), participent au métabolisme du glutathion et constituent un niveau secondaire de défense (Cnubben et al., 2001).

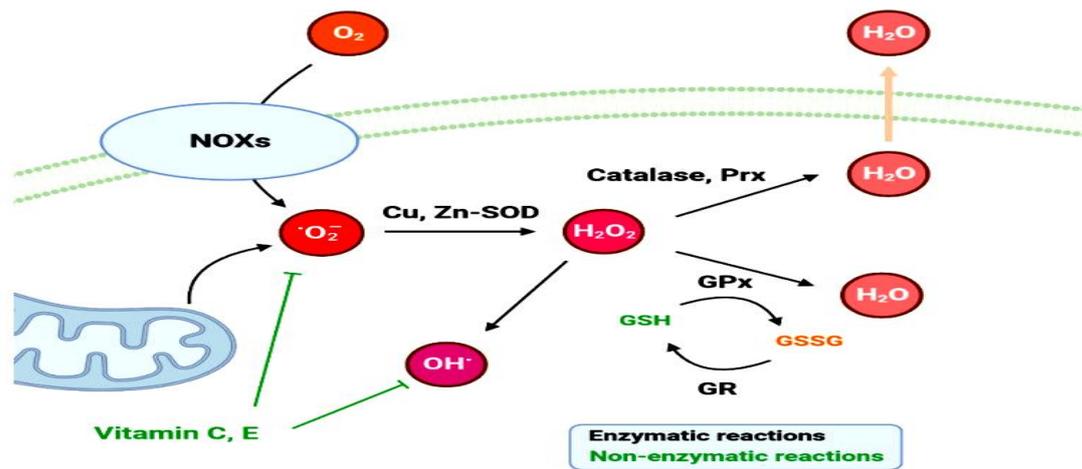
Lorsqu'elles sont exposées aux ROS, la majorité des résidus de méthionine subissent une conversion en méthionine sulfoxides, entraînant des modifications structurelles et fonctionnelles des protéines (Ezraty et al., 2005). Grâce à l'aide de la méthionine sulfoxyde réductase, l'oxydation de la méthionine par les ROS devient un processus réversible, protégeant ainsi l'intégrité et la stabilité des protéines contre les dommages oxydatifs (D'Autréaux et Toledano, 2007).

D'autres enzymes protéolytiques et des enzymes de réparation de l'ADN, qui éliminent les lésions des protéines ou de l'ADN, ont également été identifiées comme des antioxydants importants, fonctionnant indirectement dans l'équilibre redox cellulaire (Davies, 1986 ; Loft et Poulsen, 2000).

Les antioxydants non enzymatiques comprennent une gamme variée de molécules, telles que les vitamines, le glutathion et les protéines de liaison aux métaux comme la ferritine, qui neutralisent directement les ROS ou participent à la régénération des antioxydants enzymatiques (**Benzie et Devaki, 2018**). L'acide ascorbique, par exemple, communément appelé vitamine C, sert à neutraliser les radicaux libres. Les propriétés antioxydantes de la vitamine C sont principalement attribuées à sa capacité à donner des électrons, stabilisant ainsi et éteignant les réactions oxydatives dommageables initiées par les ROS (**Padayatty et al., 2003**). De plus, il a été montré que la vitamine C régénère d'autres antioxydants importants, comme la vitamine E, améliorant ainsi l'ensemble du réseau de défense antioxydante (**Shakeri et al., 2020**). Ce rôle polyvalent de ce micronutriment va au-delà de la simple élimination des radicaux, car il modifie également l'activité des facteurs de transcription impliqués dans l'expression des enzymes antioxydantes, renforçant encore la défense innée du corps contre le stress oxydatif (**Pastori et al., 2003**). De plus, les propriétés hydrophiles de la vitamine C lui permettent d'exercer son influence antioxydante tant dans les environnements aqueux que lipidiques, ce qui en fait un acteur crucial pour protéger diverses structures cellulaires contre les dommages oxydatifs (**Kaźmierczak-Barańska et al., 2020**).

Cependant, l'acide ascorbique présente également des effets pro-oxydants dans certaines conditions, notamment en présence de métaux de transition comme le fer et le cuivre. Dans ces circonstances, l'acide ascorbique peut subir un cycle redox, donnant des électrons aux métaux de transition et entraînant la génération de ROS (**Augustyniak et al., 2010**). Cette activité pro-oxydante de l'acide ascorbique a été impliquée dans la médiation des effets cytotoxiques du stress oxydatif et des dommages à l'ADN à des concentrations pharmacologiques.

Ainsi, cette propriété pourrait également être bénéfique dans les thérapies anti-tumorales en raison de l'induction associée des enzymes de réparation de l'ADN et de la cytotoxicité sélective dans les cellules tumorales (**Zamora et al., 2000 ; Nowak, 2021 ; Putschala et al., 2013**).



**Figure 11** : Présentation schématique des systèmes d'antioxydation avec des antioxydants enzymatiques et non enzymatiques (Hong *et al.*, 2024)

Les flèches noires indiquent les réactions enzymatiques et les lignes vertes indiquent les réactions non enzymatiques.

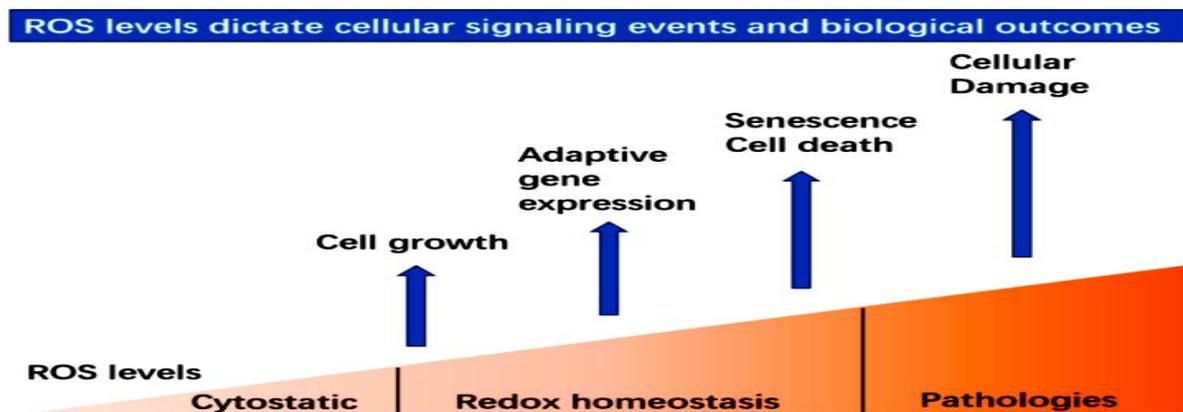
**NOXs** : les NADPH oxydases ; **SOD** : superoxyde dismutase ; **Prx** : peroxyredoxine ; **GPx** : glutathione peroxydase ; **GR** : glutathione réductase ; **GSH** : glutathion ; **GSSG** : glutathion disulfure.

#### III.4. Les ROS comme molécules de signalisation

Bien qu'elles soient traditionnellement reconnues pour leurs effets potentiellement délétères, des recherches récentes ont révélé le rôle dual des ROS en tant que molécules de signalisation vitales impliquées dans la régulation de nombreux processus biologiques (D'Autréaux et Toledano, 2007). Comme le montre la figure 12, à des niveaux physiologiques, les ROS agissent comme des molécules de signalisation cruciales dans une multitude de fonctions cellulaires, notamment la croissance cellulaire, la prolifération, la différenciation, l'apoptose, la réponse immunitaire et l'adaptation au stress (Zhang *et al.*, 2016). Lorsqu'elles dépassent la plage physiologique normale, elles entraînent des dommages cellulaires, conduisant à la pathogénie.

Le  $H_2O_2$  est considéré comme le meilleur candidat pour servir de molécule de signalisation en raison de sa stabilité supérieure, de sa réactivité sélective et de sa diffusibilité par rapport à d'autres molécules de ROS (D'Autréaux et Toledano, 2007).

La plage physiologique des concentrations intracellulaires de  $H_2O_2$  semble être conservée dans diverses formes de vie, et il devient toxique à des concentrations supérieures à  $0,5 \times 10^{-4}$  M, où il induit l'apoptose cellulaire (Giorgio *et al.*, 2007). Les ROS fonctionnent comme des messagers secondaires, via la modulation de l'activité de nombreuses enzymes, facteurs de transcription et cascades de signalisation (Zhang *et al.*, 2016). Par conséquent, comprendre la nature duale des ROS, en tant que molécules à la fois nuisibles et régulatrices, offre un aperçu essentiel de l'interaction complexe entre le métabolisme cellulaire, le stress oxydatif et la régulation des processus biologiques.



**Figure 12 :** Influence des niveaux de ROS sur les processus cellulaires et les résultats biologiques (Hong *et al.*, 2024)

### III.5. Double Rôle des ROS : Physiologique et Pathologique

Les ROS peuvent être induites par des sources exogènes telles que le tabac, la pollution, la fumée, les médicaments, les xénobiotiques ou les radiations ionisantes, entraînant des effets irréversibles sur le développement des tissus chez les animaux et les plantes. Chez ces derniers, des facteurs abiotiques comme le manque d'eau ou des températures élevées peuvent influencer leur émission. Les ROS jouent un rôle important dans les processus physiologiques et pathologiques.

Les mitochondries sont particulièrement sensibles aux dommages oxydatifs, car les électrons s'échappant de la chaîne de transport des électrons (ETC) dans la membrane interne réagissent avec l'oxygène pour produire un anion superoxyde. Cet anion est instable et ne peut pas traverser les membranes, mais il est rapidement converti en peroxyde d'hydrogène, qui est perméable à la membrane.

Celui-ci peut ensuite subir la réaction de Fenton pour produire le radical hydroxyle, hautement réactif dans la matrice mitochondriale. Des niveaux élevés de ROS entraînent une augmentation des dommages à l'ADN mitochondrial (ADNmt).

Dans les cellules eucaryotes, les ROS sont principalement produites par des réactions biochimiques dans les processus de respiration cellulaire mitochondriale (complexes I et III, situés dans la membrane interne). Les oxydases transmembranaires NADPH (NOX) et la chaîne de transport des électrons (ETC) sont les principales sources enzymatiques endogènes de  $O_2^{\cdot-}$  et  $H_2O_2$  (Fisher et Zhang, 2006). Cependant, elles proviennent également de sources telles que les peroxysomes, la xanthine oxydase (XO), les lipo- et cyclo-oxygénases, ainsi que le cytochrome P450 dans le réticulum endoplasmique (Collin, 2019).

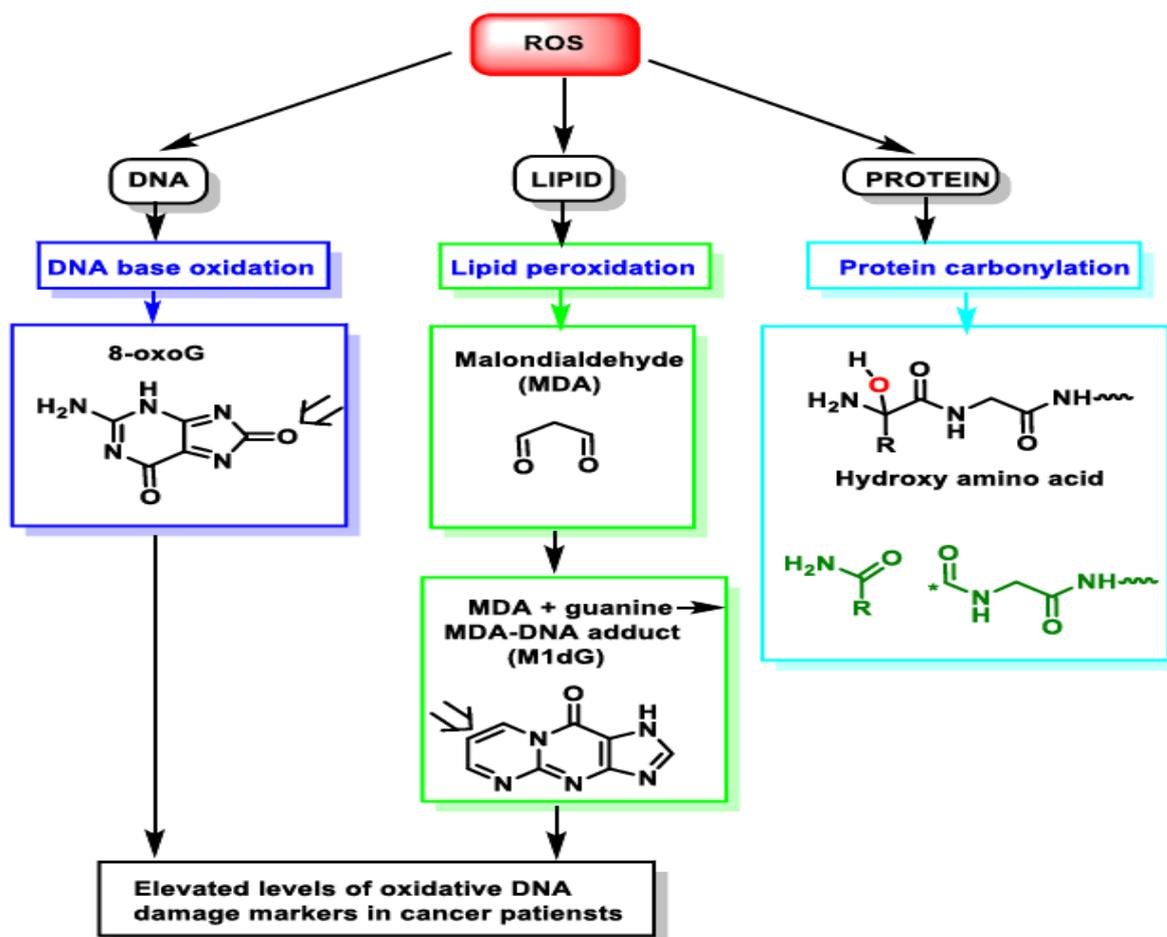
Dans les mitochondries, des niveaux physiologiques de  $O_2^{\cdot-}$  et  $H_2O_2$  participent à la signalisation redox, mais leur production augmente considérablement en conditions de stress oxydatif, entraînant un déséquilibre entre la production de ROS et l'action du système de défense antioxydant. Ce dernier inclut les enzymes SOD qui réduisent  $O_2O_2$  en  $H_2O_2$  (SOD Zn-Cu ou SOD1 dans le cytosol et l'espace intermembranaire des mitochondries, et Mn-SOD dans la matrice mitochondriale (Wen et Garg, 2018), la catalase, les peroxydases à glutathion et la thioredoxine réductase qui transforment  $H_2O_2$  en  $H_2O$  et  $O_2O_2$ .

Lors d'épisodes de stress environnemental, les dommages oxydatifs (SO) dans les cellules peuvent augmenter considérablement, causant des dommages à leurs structures (Davalli et al., 2018).

En général, les effets nocifs des ROS incluent :

- Des dommages à l'ADN ou à l'ARN (Yan et Zaher, 2019),
- La peroxydation lipidique des acides gras polyinsaturés, comme les phospholipides membranaires (Ito et al., 2019),
- L'oxydation des protéines (Hawkins et Davies, 2019).

Selon la figure 13, ces effets provoquent des dommages irréversibles à l'ADN, aux lipides et aux enzymes présentes dans le cytosol cellulaire, car les ROS oxydent et modifient les composants cellulaires, empêchant ces derniers de remplir leurs fonctions d'origine.



**Figure 13 :** L'action des ROS sur l'ADN, les lipides et les protéines conduit respectivement à l'oxydation des bases de l'ADN, à la peroxydation lipidique et à la carbonylation des protéines.

\* Électron non apparié (Andrés Juan et al., 2021)

### III.6. L'activité antioxydante des huiles essentielles de plantes

L'activité antioxydante des huiles essentielles est un domaine de recherche florissant, en raison de l'efficacité des plantes à neutraliser les radicaux libres et à réduire les dommages oxydatifs dans divers contextes pathologiques. Par exemple, *Embelia ribes* est une plante largement étudiée pour ses propriétés antioxydantes grâce à ses composés bioactifs, principalement les embélides, qui ont montré un potentiel élevé dans la prévention des maladies liées au stress oxydatif (Sharma et al., 2022). De même, les huiles essentielles des agrumes, riches en flavonoïdes et terpénoïdes, sont reconnues pour leur capacité à réduire les effets des radicaux libres et à protéger contre les maladies cardiovasculaires et neurodégénératives (Agarwal et al., 2022).

*Salvia officinalis* (sauge) est une autre plante qui possède un fort potentiel antioxydant, grâce à ses terpènes et flavonoïdes, qui ont été associés à des effets bénéfiques en aromathérapie et dans la gestion du stress oxydatif (**Mot et al., 2022**). Une étude *in silico* de l'huile essentielle de *Vitex* spp. A montré que ses composants bioactifs, tels que les terpènes et flavonoïdes, sont responsables de ses puissantes propriétés antioxydantes, contribuant à la réduction des dommages cellulaires dus au stress oxydatif (**Karakoti et al., 2022**).

Les huiles essentielles de plantes comme l'*Allium sativum* (ail), qui contient de l'allicine et d'autres composés sulfurés, ont également fait l'objet de recherches approfondies. Ces composés peuvent moduler des enzymes antioxydantes et renforcer la défense de l'organisme contre les dommages oxydatifs (**Herrera-Calderon et al., 2021**). L'huile essentielle de *Valeriana pilosa* a aussi montré des résultats prometteurs, avec une activité antioxydante et des effets bénéfiques contre certains types d'enzymes impliquées dans les processus biologiques de redox (**Minchán-Herrera et al., 2022**).

Les recherches récentes ont également mis en lumière l'importance des huiles essentielles dans des applications thérapeutiques modernes. *Scutellaria edelbergii*, par exemple, présente un profil chimique intéressant et un potentiel antioxydant significatif, bien qu'elle nécessite davantage d'études pour évaluer ses effets médicaux (**Shah et al., 2022**).

D'autres études ont analysé les huiles essentielles des plantes amazoniennes telles que *Duguetia* et *Xylopia* (Annonaceae), qui possèdent non seulement des propriétés antioxydantes, mais également des qualités antimicrobiennes et anticancéreuses (**Cascaes et al., 2022**).

En ce qui concerne la toxicité, l'huile essentielle de *Myrciaria floribunda* et *Myrcia sylvatica* a montré un bon potentiel antioxydant, mais des tests de toxicité sont nécessaires avant leur utilisation clinique (**De Moraes et al., 2022**). *Croton campinarenensis* est une autre huile essentielle d'Amazonie qui a révélé un excellent pouvoir antioxydant et a été étudiée pour son activité *in silico*, ce qui en fait un candidat intéressant pour des applications thérapeutiques (**Da Costa et al., 2022**).

Concernant les huiles essentielles provenant de *Artemisia judaica* et *Ammi visnaga*, leur capacité antioxydante a été confirmée à la fois in vitro et in vivo, offrant des perspectives d'utilisation pour lutter contre le stress oxydatif et l'inflammation (**Mohammed et al., 2022 ; Kamal et al., 2022**). *Heracleum persicum*, lorsqu'elle est formulée en nanoémulsion, a montré des résultats prometteurs, en particulier dans la livraison de composés antioxydants et anticancéreux (**Bashlouei et al., 2022**).

Aussi, les huiles essentielles de *Ocimum basilicum* (basilic) ont été étudiées pour leurs effets antioxydants, notamment dans le cadre de régimes alimentaires de truites arc-en-ciel, montrant une modulation des défenses antioxydantes et une amélioration de la santé globale de l'animal (**Magara et al., 2022**).

Enfin, d'autres études ont confirmé l'efficacité de l'huile essentielle de *Citrus sinensis* pour ses capacités antioxydantes, en plus de ses propriétés de préservation des aliments contre les bactéries pathogènes (**Fusaro et al., 2022 ; Manzur et al., 2023**).

Ainsi, ces recherches soulignent que les huiles essentielles sont des ressources précieuses non seulement pour la santé humaine, mais aussi pour la protection des aliments et des environnements biologiques contre les effets néfastes des radicaux libres et du stress oxydatif (**Luca et al., 2023**).

## **Partie II**

# **Etude expérimentale**

## Partie II. Etude expérimentale

### I. Présentation de la zone d'étude

#### I.1. Introduction

La forêt de Sdama Chergui est une forêt située dans la région ouest de l'Algérie, qui traverse deux wilayas, Tiaret et Mascara. Elle est entourée de paysages typiques des Hauts Plateaux, avec des reliefs modérés et un environnement semi-arides. La superficie de cette forêt est de 44 000 hectares. On y trouve de nombreuses enclaves, qui sont exploitées par l'agriculture. La plus grande vallée est celle d'Oued Louhou, qui couvre une superficie de 1500 hectares.

#### I.2. Situation de la forêt de Sdama Chergui

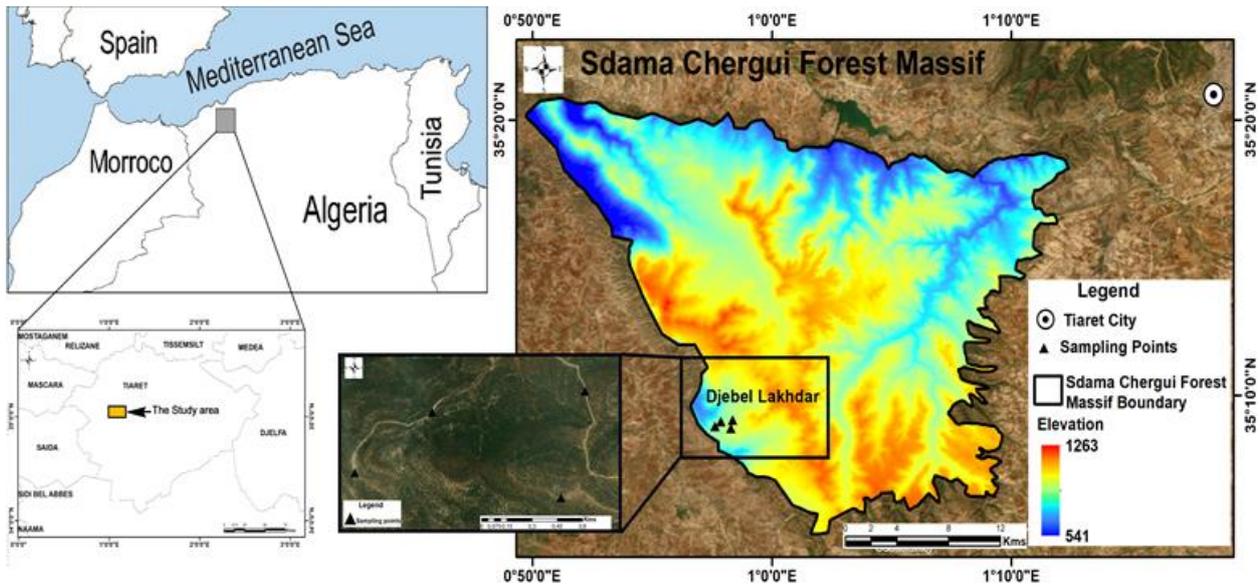
La forêt des Sdama Chergui, située dans l'Atlas tellien, appartient au sous-bassin versant de l'Oued Mina. Cette position influence fortement son écologie et ses ressources en eau. Son emplacement au cœur de l'Atlas tellien lui confère un relief varié, tandis que l'hydrologie de la région est dominée par l'Oued Mina, qui joue un rôle essentiel dans l'équilibre de l'écosystème local.

##### I.2.1. Situation géographique

La forêt des Sdama Chergui (**fig 14**) fait partie des monts de Frenda. Elle se situe entre les parallèles 35° 5' et 35° 20' de latitude nord et entre les méridiens 0° 47' et 1° 30' à l'est du méridien de Greenwich. Elle est délimitée de la manière suivante :

- Au Nord-Est : Par les Ouled Ben Affane (limite administrative).
- Au Nord-Ouest : Par une rupture de pente qui marque la fin de la zone montagneuse.
- Au Sud : Par la route nationale N°14, reliant Frenda à Tiaret, en direction de Mascara, avec des variations de la limite selon la topographie.
- À l'Est : Par une limite naturelle déterminée par le relief.
- À l'Ouest : Par l'Oued Tat dans la partie nord, et par une rupture de pente des djebels parallèles à cet oued dans la partie sud.

Ces limites définissent la position et l'étendue géographique de la forêt dans la région des monts de Frenda (CFT, IFN, 2020).



**Figure 14** : Carte de situation géographique de Sdama Chergui  
(Bensaadi, 2024)

### I.2.2. Situation administrative

La forêt de Sdama Chergui est principalement située dans la wilaya de Tiaret. Elle dépend administrativement des daïras de Frenda, Medroussa et Mechraâ Sfa. Son territoire couvre plusieurs communes, à savoir :

- Frenda, Medroussa, Sidi-Bakhti, Si Djillali Ben Amer, Mechraâ Sfa (dans la wilaya de Tiaret).
- Une partie s'étend également sur la commune d'Ain Ferrah (relevant de la daïra de Tighenif dans la wilaya de Mascara).

Cette forêt couvre donc des territoires situés dans deux wilayas, avec une présence prédominante à Tiaret (CFT, IFN, 2020).

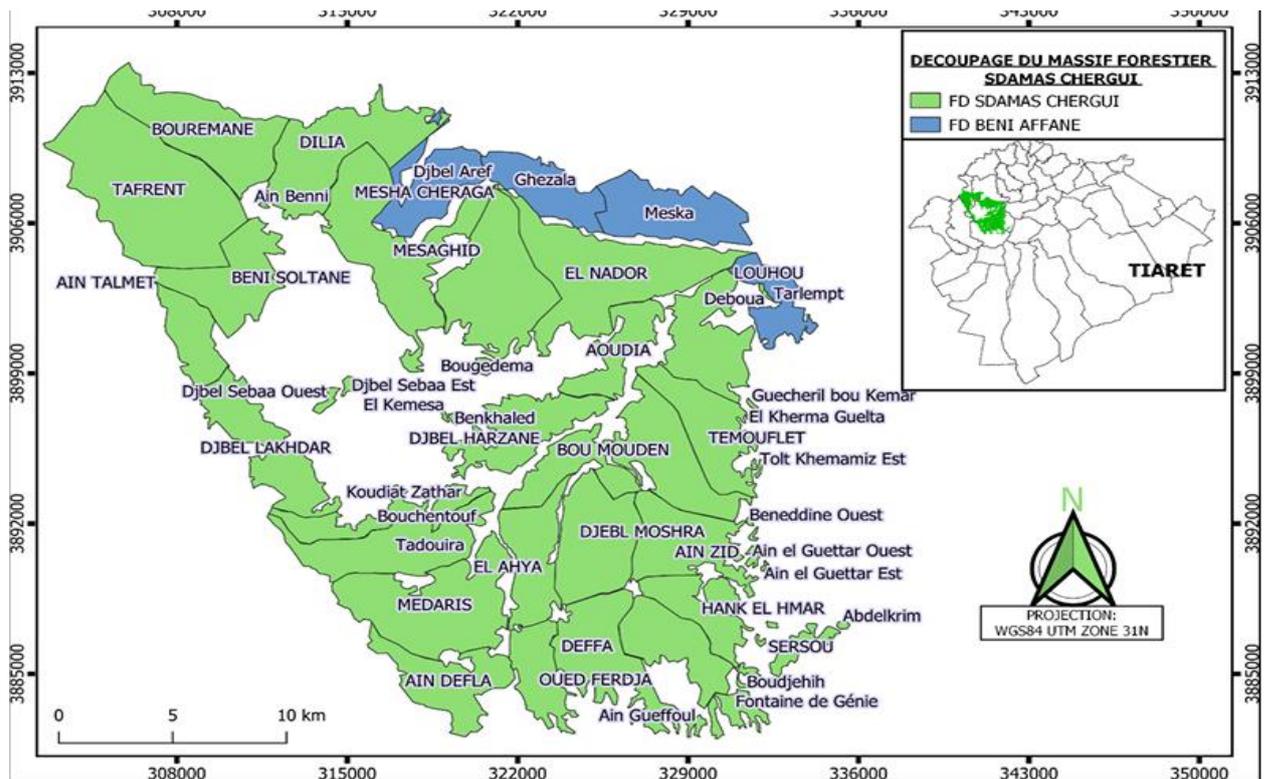
### I.2.3. Situation forestière

La Conservation des Forêts de Tiaret englobe les circonscriptions de Medroussa et Frenda, ainsi que les districts de Medroussa, Frenda, et Mechraâ Sfa.

Le canton d'Oued Tat fait partie de la circonscription des Forêts de Tighenif, relevant de la Conservation des Forêts de Mascara (CFT, IFN, 2020).

### I.2.4. Situation cartographique

La forêt des Sdama Chergui est une forêt domaniale couvrant une superficie de 44 000 hectares et répartie en 54 cantons dont les principaux sont : Canton de Si Djillali Ben Amer, Canton de Sidi Bakhti, Canton de Frenda, Canton de Medroussa, Canton de Mechraâ Sfa et Canton d'Ain Ferrah (ce canton s'étend en partie dans la wilaya de Mascara, relevant de la daïra de Tighenif) (fig15).



**Figure 15 :** Carte de découpage en cantons du massif des Sdama Chergui (CFT 2022)

Elle se distingue par son enclavement géographique. La gestion de son territoire repose sur un fond cartographique composé de cinq cartes d'état-major, offrant ainsi une vue détaillée pour une gestion efficace de la zone (CFT, IFN, 2020).

### I.3. Description du milieu physique

#### I.3.1. Le relief

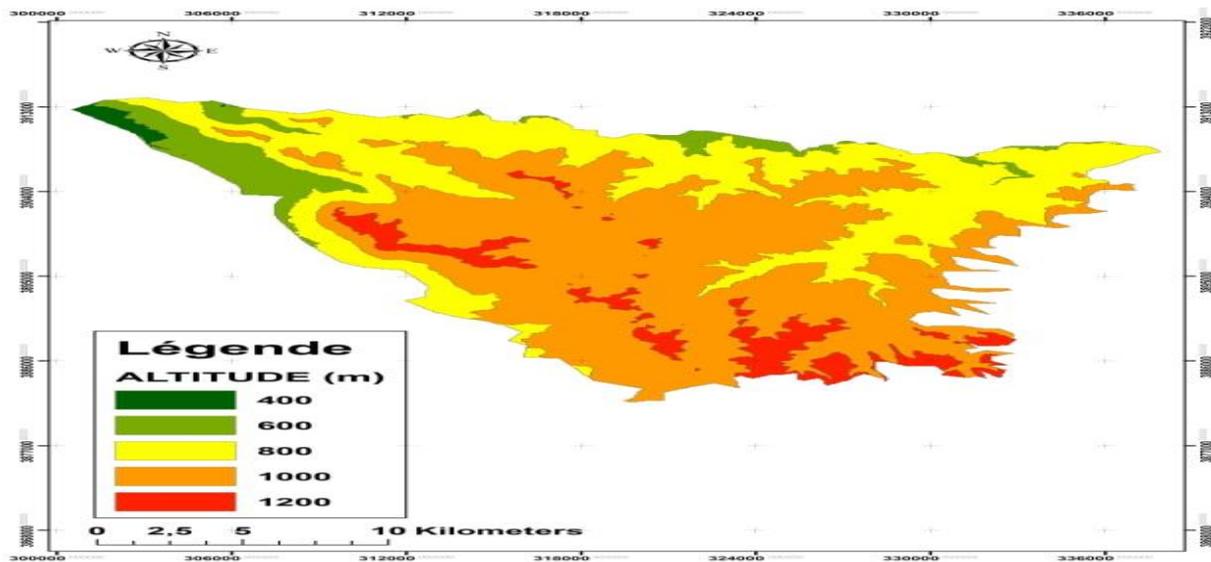
La forêt de Sdama Chergui occupe un massif montagneux appelé les monts de Frenda, qui constitue le dernier contrefort de l'Atlas tellien. Le point culminant de cette forêt se situe à 1244 mètres, au djebel Adjdar, dans le sud-est de la forêt, avec des coordonnées de 362,363 et 220,201.

Ce massif montagneux, dont les altitudes varient entre 800 m et 1250 m, est traversé par un réseau hydrographique bien marqué, orienté globalement du nord au sud. Ce relief a donné naissance à une topographie découpée en lanières, parallèles aux oueds et aux sommets plats, résultat de la structure géologique de la région. Les altitudes diminuent progressivement en allant du sud-est vers le nord-ouest.

Dans l'ensemble, le relief est relativement peu accidenté à l'est, et devient vallonné dans le centre et le sud. Les versants sont de forme convexe-concave, avec parfois une concavité basale prolongée. À l'ouest et au nord-ouest, le terrain est beaucoup plus accidenté, avec des versants à forte pente et des abrupts qui dépassent parfois 10 mètres de hauteur, principalement dus à la géologie de la région, composée de bancs de calcaire et de dolomie.

En résumé, la forêt des Sdama Chergui présente un relief mouvementé dans son ensemble, avec une altitude moyenne qui augmente en direction de l'est et atteint son sommet à 1244 m dans la partie sud et sud-ouest, au niveau du djebel Adjdar (**CFT 2016 in kouadria 2019**).

La figure 16 représente la carte des altitudes du massif forestier de Sdama Chergui.



**Figure 16 : Carte des altitudes du massif forestier de Sdama Chergui  
(CFT 2016 in kouadria 2019)**

### I.3.2. La pente

Le tableau 2 présente la répartition des pentes dans la forêt de Sdama Chergui en fonction de quatre classes de pentes, ainsi que le pourcentage de la superficie de la forêt correspondant à chaque classe.

**Tableau 2 : Les classes de pentes (CFT, IFN, 2016)**

Pentes	0% < P < 15 %	15 % < P < 30 %	30% < P < 60	P > 60%.
Classes de pente	Classe de faible pente	Classe de moyenne pente	Classe de forte pente	Classe de pente très forte
Taux	30.31 %	33.41%	32.08 %	4.18

La forêt de Sdama Chergui se caractérise par une diversité de pentes. Ainsi, environ 30,31 % de la forêt présente des zones à faible pente (de 0 % à 15 %), offrant des terrains favorables à diverses activités humaines. Environ 33,41 % de la superficie se trouve sur des pentes modérées (entre 15 % et 30 %), qui forment la plus grande portion de la forêt et sont relativement accessibles, bien que vulnérables à l'érosion.

Les zones à forte pente (entre 30 % et 60 %) couvrent 32,08 % du territoire forestier, ce qui limite l'accessibilité et complique l'exploitation, mais ces zones sont cruciales pour la préservation de la biodiversité.

Enfin, les zones à pente très forte (supérieures à 60 %) représentent 4,18 % de la superficie, souvent inaccessibles, et jouent un rôle essentiel dans la protection des écosystèmes, en offrant des habitats naturels peu perturbés.

#### I.4. Hydrographie

La forêt de Sdama Chergui est traversée par un réseau hydrographique dense et bien structuré, profondément encaissé. Ce réseau comprend des Oueds et des Chaâbats qui captent les eaux de pluie et les sources, les dirigeants vers l'aval de l'Oued Mina.

Les deux principaux oueds qui parcourent la forêt du sud au nord sont l'Oued Louhou et l'Oued Medroussa. Ces cours d'eau, à écoulement permanent, présentent trois niveaux distincts : le chenal d'étiage, le lit apparent et le lit majeur, ce dernier étant inondé uniquement lors de crues exceptionnelles.

Leur vallée, en forme de U, est caractéristique du bassin méditerranéen. Pendant la saison sèche, l'écoulement est réduit à un mince filet d'eau qui suit le chenal d'étiage.

Ces deux principaux oueds sont alimentés par de nombreux affluents (Oueds secondaires et Chaâbats) qui augmentent leur débit pendant la saison des pluies. Dans la partie ouest de la forêt, plusieurs Oueds secondaires et Chaâbats coulent du sud-est vers le sud-ouest, perpendiculaires à l'Oued Tat, et se jettent dans l'Oued Mina au nord.

D'autres oueds moins importants, tels que l'Oued Messarhid, l'Oued Cherchar, l'Oued Safsaf et l'Oued Belhadri, prennent leur source dans les djebels de Cheurfa, Rekhma et Rhezala, et se déversent directement dans le barrage de Bakhdda (**Gourari, 2005**).

## I.5. Pédologie

Le sol de la forêt de Sdama Chergui se caractérise par une grande diversité, façonnée par la géologie, le climat et la végétation de la région. Les types de sols présents sont classés suivant la classification française de 1967. Voici un aperçu des principales classes de ces sols :

### I.5.1. Sols minéraux bruts

Ces sols, développés sur des dolomies et du grès calcaire, sont peu profonds (moins de 20 cm). Leur coloration reflète les matériaux d'origine, et ils contiennent de nombreux éléments grossiers (graviers, cailloux, blocs). Ces caractéristiques résultent d'une forte érosion sur des versants à pente élevée (jusqu'à 50 %), typiques des lithosols.

### I.5.2. Sols peu évolués

Ces sols incluent deux sous-catégories non climatiques :

- **Sols lithiques d'érosion** : Leur horizon de surface est faiblement développé comparé aux sols minéraux bruts, en raison de variations lithologiques ou d'un adoucissement de pente. Leur profondeur limitée constitue leur principale contrainte.
- **Sols modaux d'apport colluvial** : Plus évolués, ils présentent une texture argilo-limoneuse et un pH alcalin. Ces sols sont très localisés dans la forêt.

### I.5.3. Sols sesquioxydes de fer

Ces sols rouges méditerranéens, formés sur des roches bien drainées, apparaissent dans des zones bénéficiant d'une saison humide. Ils se distinguent par leurs propriétés physiques favorables (porosité, structure de surface), qui leur confèrent une bonne valeur forestière.

### I.5.4. Sols calcimagnésiques

Ils comprennent deux types principaux :

- **Rendzines** : Sols carbonatés peu profonds (environ 20 cm) avec un profil A/C, une texture limoneuse et un pH alcalin. Les peuplements de pin d'Alep y prospèrent, malgré leur faible profondeur.
- **Sols bruns calcaires modaux** : Développés sur marne, ces sols possèdent un profil A(B)C plus profond et une richesse en matière organique en surface, qui diminue avec la profondeur. Ils sont riches en calcaire en raison du substrat carbonaté.

## I.6. Etude climatique

Le climat de la forêt de Sdama Chergui est typique des régions de l'Atlas tellien, caractérisé par un climat méditerranéen semi-aride, influencé par la proximité de la mer Méditerranée, mais également par l'altitude et les reliefs montagneux.

Ce climat, soumis à des changements saisonniers prononcés, agit directement sur la flore et les réserves en eau de la forêt.

Le climat est défini comme l'interaction de l'ensemble des éléments atmosphériques tels que la température, la pluviométrie, le vent, etc. Ces facteurs ont une influence considérable non seulement sur la répartition des essences forestières, mais aussi sur la productivité forestière.

### I.6.1. Les facteurs climatiques

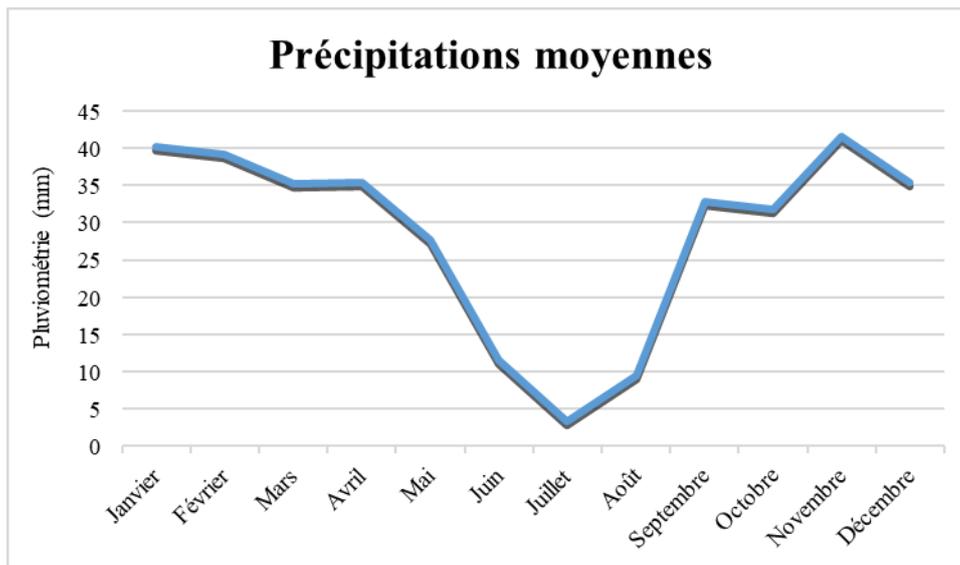
Les facteurs climatiques sont les éléments de l'atmosphère qui influencent directement le climat d'une région.

#### I.6.1.1. Les précipitations

Située au nord-ouest de l'Algérie, la région de Tiaret est soumise à un climat méditerranéen influencé par des conditions continentales, ce qui engendre une alternance notable des précipitations selon les saisons et l'altitude.

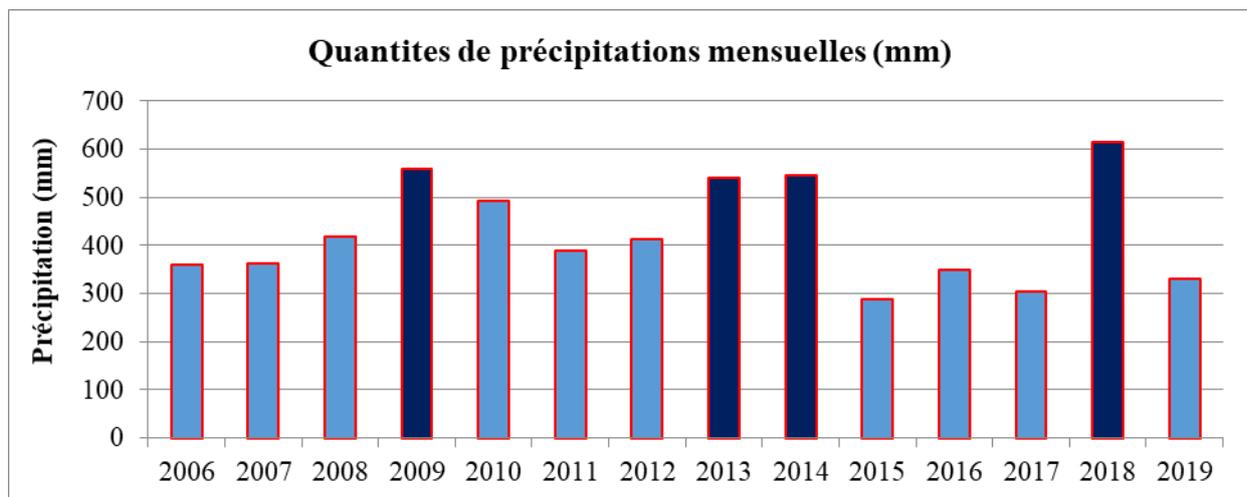
La région de Tiaret reçoit en moyenne entre 400 et 500 mm de précipitations annuelles, bien que ces valeurs puissent varier en fonction de la topographie et des microclimats locaux. Les altitudes plus élevées, notamment celles situées à proximité des montagnes, tendent à enregistrer des précipitations plus abondantes en raison de l'effet orographique, qui favorise l'ascension et la condensation de l'air humide.

La figure 17 illustre une répartition saisonnière des précipitations à Tiaret, avec des hivers humides, des étés secs, et une augmentation progressive des précipitations à l'automne. Cette tendance est typique des régions à climat méditerranéen, avec des précipitations maximales en hiver et minimales, voire inexistantes en été.



**Figure 17 :** Précipitation mensuelle moyenne de la région de Tiaret entre 1984 et 2019  
(Station météorologique de Ain Bouchekif)

La figure 18 démontre la quantité de pluie moyenne entre les années 2006 et 2019.



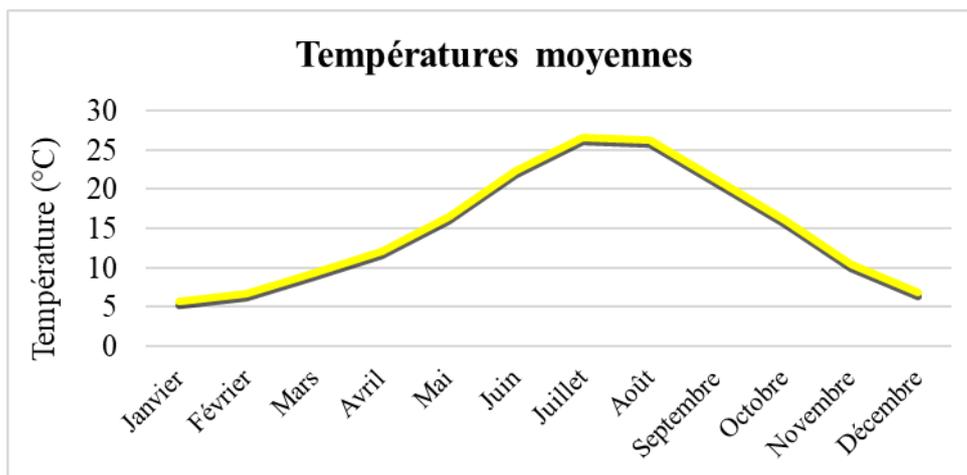
**Figure 18 :** Quantités de précipitations mensuelles de la région de Tiaret entre 2006 et 2019 (Station météorologique de Ain Bouchekif)

### I.6.1.2. La température

La température joue un rôle crucial dans la croissance des végétaux, et son évolution dépend de plusieurs facteurs, dont l'altitude.

La caractérisation de la température d'un lieu spécifique repose généralement sur l'analyse de plusieurs variables essentielles, telles que les températures maximales et minimales, ainsi que moyennes saisonnières et annuelles.

Le graphique représenté dans la figure 19 met en évidence une variabilité saisonnière marquée, caractérisée par des étés chauds (pics de chaleur en juillet et août) et des hivers froids (surtout janvier et décembre), typiques des climats continentaux ou méditerranéens. Ces fluctuations de température ont un impact direct sur la végétation locale et les pratiques agricoles, car elles déterminent les périodes propices pour la croissance des plantes. De plus, les cycles de température influencent les activités écologiques de la région, affectant les cycles de vie des espèces végétales et animales ainsi que les calendriers agricoles.



**Figure 19** : Températures moyennes de la région de Tiaret entre 1984 et 2019  
(Station météorologique de Ain Bouchekif)

### I.6.1.3. Facteurs climatiques supplémentaires

#### I.6.1.3.1. Le vent

Le vent est un facteur clé dans la dispersion des graines et des végétaux. Dans la région étudiée, les vents dominants soufflent principalement depuis le nord-ouest. Ces caractéristiques doivent être prises en compte dans les projets d'aménagement, notamment pour le tracé des Travaux de Protection Forestière (TPF). Pendant la saison estivale, le sirocco, vent chaud et sec, favorise la propagation des incendies de forêt en augmentant le risque d'inflammabilité, en particulier pour les espèces résineuses.

#### I.6.1.3.2. L'humidité relative

L'humidité relative moyenne annuelle est d'environ 59 %, atteignant son minimum pendant les mois de juillet et août (moins de 40 %) et son maximum durant décembre et janvier (supérieur à 75 %). Ces variations influencent les conditions de croissance des plantes et le risque de dessèchement ou de maladies liées à l'humidité.

### I.6.1.3.3. Les gelées

Les gelées blanches sont fréquentes sur les hauts plateaux, avec un nombre moyen annuel de 34 jours de gel. Le mois de janvier enregistre les valeurs les plus élevées (plus de 10 jours de gel), mais les gelées des mois de mars et avril, bien qu'en moyenne de 5 jours par mois, sont particulièrement importantes car elles coïncident avec la reprise de la végétation, pouvant ainsi affecter les jeunes pousses et les cultures.

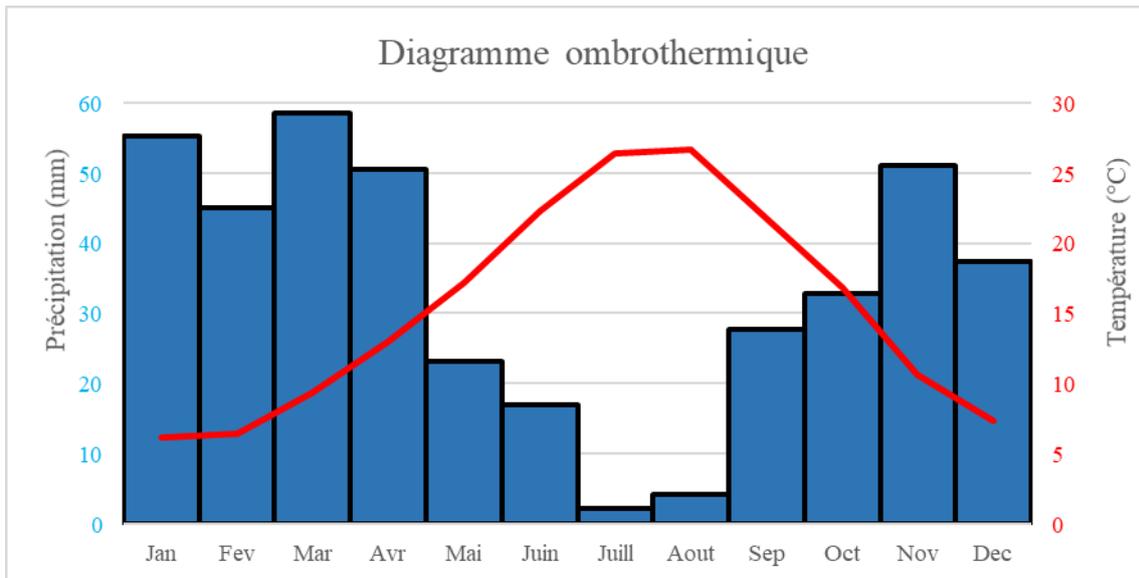
### I.6.2. Synthèse climatique

Pour déterminer le climat d'une région spécifique, il est important d'analyser un ensemble de données climatiques collectées sur une période prolongée, en utilisant les indices de Gaussen pour identifier les périodes sèches et la classification des climats d'Emberger, utilisée pour les climats méditerranéens, basée sur l'indice pluviométrique et la température.

#### I.6.2.1. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen

Selon **Bagnouls et Gaussen (1954)**, le diagramme ombrothermique est un graphique qui représente la relation entre les précipitations et la température d'une région, facilitant ainsi l'analyse du climat et la détection des périodes de sécheresse. Son objectif principal est d'illustrer, au cours de l'année, les périodes sèches et humides en utilisant une échelle spécifique adaptée à ces variables. La température moyenne mensuelle, exprimée en degrés Celsius, est indiquée sur l'axe vertical à gauche, tandis que les précipitations mensuelles, en millimètres, figurent sur l'axe vertical à droite. Afin de respecter une règle d'équivalence (1 mm de précipitation équivaut à 2 °C), l'échelle des précipitations est doublée par rapport à celle de la température ( $P = 2T$ ). L'axe horizontal représente les mois de l'année, généralement de janvier à décembre, permettant ainsi de visualiser les variations climatiques saisonnières et d'identifier les moments critiques pour la végétation.

La figure 20 illustre la courbe ombrothermique de la région de Tiaret sur une durée s'étalant de 2011 à 2020.



**Figure 20** : Diagramme Ombrothermique de la région de Tiaret (2011-2020)

D'après le graphique ci-dessus, la période sèche s'étale de la fin avril jusqu'à la mi-octobre et dure presque 6 mois.

### I.6.2.2. Quotient pluviométrique d'Emberger

En 1955, **Emberger** avait établi un quotient pluviométrique utilisé pour classer les zones en étages bioclimatiques en fonction de la répartition des précipitations et de la température. Il se calcule avec la formule suivante :

$$Q2 = 2000 \times P/M^2 - m^2$$

Avec :

**P** : Précipitation moyenne annuelle en mm.

**M** : Température moyenne maximale du mois le plus chaud en °K.

**m** : Température moyenne minimale du mois le plus froid en °K.

**Stewart (1969)** avait apporté des modifications sur la formule et l'avait présenté comme suit :

$$Q3 = 3.43 \times P/M - m$$

**P** : Précipitation moyenne annuelle en mm.

**M** : Température moyenne maximale du mois le plus chaud en °C.

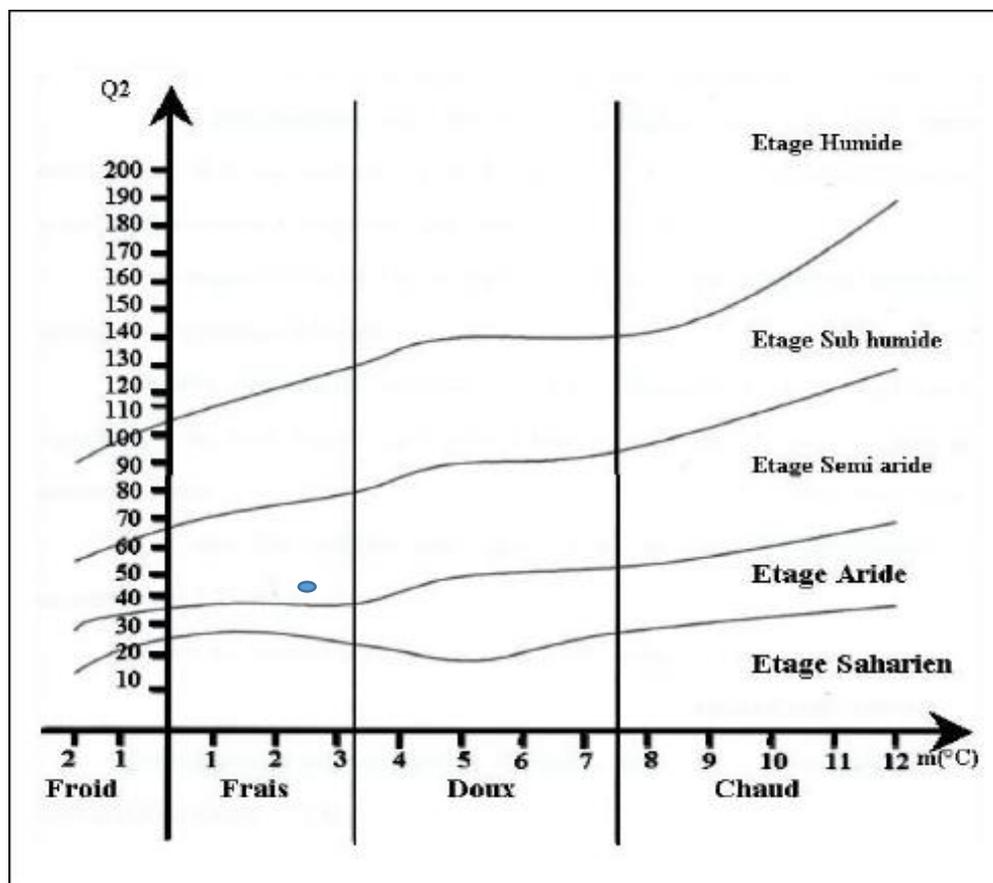
**M** : Température moyenne minimale du mois le plus froid en °C.

Le tableau ci-dessous présente les données pour le calcul du  $Q^3$  pour la période entre 2011 et 2020.

**Tableau 3 :** Quotient pluviométrique de Stewart

Période	P	M	m	$Q^3$
2011-2020	404.23	31.92	2.86	47.74

Le climagramme d'Emberger représenté dans la figure 21 révèle que la wilaya de Tiaret se situe dans l'étage bioclimatique semi-aride à hiver frais sur la période allant de 2011 jusqu'à 2020.



**Figure 21 :** Climagramme D'Emberger et position de la wilaya de Tiaret durant la période 2011-2020

### I.7. La végétation

Le couvert végétal de la forêt de Sdama Chergui est caractérisé par une diversité de plantes, bien que la dégradation de l'écosystème ait conduit à une transformation partielle de la zone. Environ 50 % de la surface totale est désormais recouverte de maquis, une végétation de plus faible hauteur. La forêt est dominée par le Pin d'Alep, mais on y trouve aussi d'autres espèces comme le Thuya, le chêne Kermes et l'oléastre, qui sont moins fréquentes. Le sous-bois est constitué de plantes telles que le lentisque, le genévrier oxycèdre, le doum, la phyllaire et le romarin.

La régression du couvert végétal a été provoquée par divers facteurs, notamment les activités humaines, les incendies récurrents et les fluctuations climatiques. Cette transformation du paysage forestier rend indispensable la mise en œuvre de mesures de préservation afin de rétablir l'équilibre écologique et de renforcer la biodiversité de cet écosystème (CFT, IFN, 2020).

## II. Matériels et méthodes

### II.1. Objectif

Endémique d'Afrique du nord, le *Tetraclinis articulata*, appelé également le Thuya de Berbérie ou Araar, utilisé depuis l'antiquité comme plante médicinale, a été le sujet de cette étude dont l'objectif était l'extraction de son huile essentielle, la caractérisation de sa composition chimique, l'étude de l'influence de l'exposition géographique, de l'altitude et du pH du sol sur le rendement et le profil chimique de cette huiles obtenue des feuilles récoltées du massif de Sdama chergui région de Tiaret. La valorisation de l'huile essentielle a été réalisée en évaluant son activité antioxydante.

### II.2. Matériel végétal et échantillonnage

La récolte des feuilles de *Tetraclinis articulata* a été effectuée au mois d'avril 2018 dans la forêt de Sdama Chergui, présentant un relief dominé par Djebel Lakhder, qui a été pris comme point de référence pour déterminer les quatre expositions géographiques (Nord, Sud, Est et Ouest) et à différentes altitudes. Ce massif forestier est caractérisé par un climat semi-aride et un couvert végétal très varié, avec une plantation prédominante de *Tetraclinis articulata*, *Quercus ilex* et de *Juniperus oxycedrus*. On note également la présence de *Rosmarinus officinalis*, *Ampelodesmos mauritanicus*, de *Pistacia lentiscus*, *Phillyrea angustifolia* et *Phillyrea latifolia*.

Un échantillonnage aléatoire stratifié a été mis en place afin d'assurer une représentativité écologique de chaque exposition. Ainsi, 20 arbres ont été sélectionnés aléatoirement par orientation, soit un total de 80 arbres. Pour chaque arbre, 10 échantillons de feuilles ont été prélevés à différentes hauteurs et orientations (parties supérieures, intermédiaires et inférieures), de manière à capter la variabilité intra-arbre. Cette méthode permet de tenir compte à la fois de l'effet de l'exposition géographique et de la distribution foliaire.

Les feuilles fraîchement récoltées ont été séchées à l'air libre, à température ambiante et à l'abri de la lumière, broyées puis conservées loin de toute humidité et sorte de contamination.

### II.3. Détermination du pH du sol

La mesure du pH du sol a été réalisée conformément au protocole standard. Des échantillons composites ont été obtenus à partir de prélèvements effectués entre 0 et 20 cm de profondeur, après élimination de la litière. Une suspension sol-eau (rapport 1:5) a été préparée avec de l'eau distillée. Après trois cycles d'agitation et de repos, la mesure du pH a été effectuée à l'aide d'un pH-mètre préalablement étalonné à l'aide de solutions tampons à pH 4 et 7. La lecture du pH a été prise après stabilisation de la valeur, et l'électrode a été rincée à l'eau distillée entre chaque mesure.

### II.4. Extraction de l'huile essentielle

L'huile essentielle de *Tetraclinis articulata* a été extraite à l'aide d'un hydrodistillateur de type Clevenger. Dans un ballon d'un litre, 100g de matière sèche était immergée dans 750 mL d'eau distillée, le tout était mis à ébullition durant 3 heures (Chefnaj et al., 2023).

L'huile essentielle récupérée après décantation est séchée en utilisant le sulfate de sodium anhydre (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), placée dans un tube hermétique et opaque et enfin conservée à 4° C jusqu'à utilisation ultérieure.

### II.5. Calcul du rendement

Le rendement exprimé en pourcentage (%) est la quantité d'huile essentielle obtenue à partir d'une plante en fonction de la matière végétale utilisée initialement. Il est calculé selon la formule suivante :

$$\text{Rendement HE (\%)} = \frac{\text{Masse de l'HE extraite (g)}}{\text{Masse de la matière végétale sèche (g)}} \times 100$$

### II.6. Caractérisation chimique des huiles essentielles de *Tetraclinis articulata*

L'analyse des huiles essentielles est effectuée par une méthode chromatographique. La GC/MS (Chromatographie en phase gazeuse couplée à la Spectrométrie de Masse) est fréquemment employée pour identifier et mesurer les composés volatils qu'elles contiennent.

### II.6.1. Analyse par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC/MS)

L'analyse qualitative des huiles essentielles a été effectuée à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse de marque Bruker Scion SQ couplé à un spectromètre de masse à unique quadripôle. La source d'ions maintient une température constante de 280 ° ; la fragmentation est réalisée par impact électronique sous un champ électrique de 70 eV, avec une exploration de masse dans une plage de 35 à 600 Da.

L'appareil est équipé d'une colonne capillaire de type DB-5 (longueur : 25 m ; diamètre : 0,220 mm ; épaisseur du film : 0,25 µm). Le programme de température a été réglé de 50°C pendant 10 minutes à 250°C, maintenu pendant 15 minutes, avec une augmentation de 2°C par minute. Pour l'injection, 0.2 µL d'échantillon a été injecté en mode Split, avec un rapport de 1/100. L'Helium a été utilisé comme gaz porteur, avec un débit constant de 1 mL/min tout au long de l'opération.

### II.6.2. Identification des composés chimiques

Les composants ont été déterminés en comparant leurs temps de rétention (RT) avec ceux d'échantillons de référence, calculés à l'aide d'une série homologue d'alcane n-C8 à n-C28. Par la suite, les spectres de masse détectés ont été confrontés à ceux répertoriés dans les bibliothèques commerciales MS NIST 2020 et Wiley 07, mais aussi aux résultats obtenus d'études antérieures.

### II.7. Dosage des polyphénols totaux

Le dosage des polyphénols totaux est une méthode analytique employée pour mesurer la concentration globale des composés phénoliques présents dans un échantillon. Ces composés sont connus pour leurs propriétés antioxydantes et leur rôle protecteur contre de nombreuses maladies.

Effectué généralement par des techniques colorimétriques, cette analyse utilise des réactifs spécifiques qui interagissent avec les polyphénols pour générer une coloration détectable.

### II.7.1. Principe

La quantité de polyphénols est déterminée en utilisant le réactif de Folin-Ciocalteu, composé principalement par l'acide phosphotungstique ( $H_3PW_{12}O_{40}$ ) et l'acide phosphomolybdique ( $H_3PMO_{12}O_{40}$ ), qui réagissent avec les polyphénols après réduction dans un milieu alcalin, et forment ainsi un complexe bleu de tungstène et de molybdène ( $MogO_{23}$ ) (Ribéreau *et al.*, 1972).

L'intensité de cette coloration, mesurée par spectrophotométrie, est directement proportionnelle à la concentration de composés phénoliques présents dans l'échantillon (Georgé *et al.*, 2005).

### II.7.2. Mode opératoire

La méthode de Merouane *et al.* (2014) a été utilisée pour déterminer la teneur totale en phénol de l'huile essentielle de *Tetraclinis articulata*, en utilisant le réactif de Folin-Ciocalteu et l'acide gallique à différentes concentrations connues comme standard.

Ainsi, 50  $\mu$ L d'huile essentielle ont été introduit dans un tube à essai, contenant 500  $\mu$ L de réactif de Folin-Ciocalteu dilué dix fois (1 :10) et 450  $\mu$ L d'eau distillée. Après agitation vigoureuse et repos pendant 5 min, 400  $\mu$ L d'une solution de carbonate de sodium ( $Na_2CO_3$  à 7,5 %) a été ajouté pour alcaliniser le milieu et favorisant ainsi l'apparition de la couleur bleue. Incuber le mélange à 24° C pendant 40 min. L'absorbance a été effectuée par la lecture, contre un blanc à l'aide d'un spectrophotomètre, à une longueur d'onde de 760 nm.

La courbe d'étalonnage de l'acide gallique est utilisée pour convertir l'absorbance de l'échantillon en concentration de polyphénols totaux, exprimée en mg équivalent d'acide gallique par gramme d'échantillon (mg EAG/g).

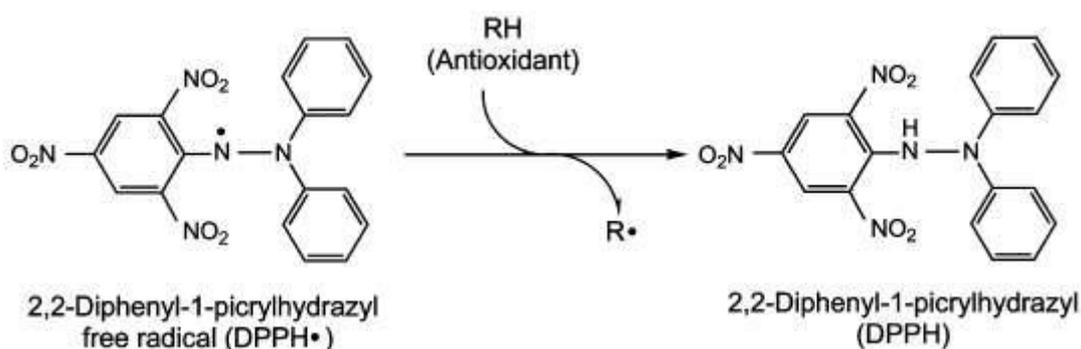
### II.8. Mesure du pouvoir de piégeage des radicaux DPPH

Afin de valoriser l'huile essentielle de *Tetraclinis articulata*, la détermination de son activité antioxydante a été réalisée en utilisant le test DPPH.

### II.8.1. Principe

Le pouvoir de piégeage des radicaux libres DPPH est une méthode fréquemment employée pour mesurer l'activité antiradicalaire d'une substance, d'une huile essentielle ou d'un extrait. Le DPPH (2,2-Diphényl-1-picrylhydrazyl) est un radical libre stable présentant une couleur pourpre intense en raison de sa structure moléculaire qui vire vers le jaune lorsqu'il est neutralisé par des composés antioxydants (Figure 22).

Cette décoloration révèle le pouvoir antioxydant d'un échantillon en indiquant sa capacité à piéger le radical, ce qui se traduit par une diminution de l'absorbance à 517 nm (Moon et Shibamoto, 2009).



**Figure 22 :** Reaction entre le radical DPPH\* et l'antioxydant pour former le DPPH stable (Moon et Shibamoto, 2009)

### II.8.2. Mode opératoire

L'activité antioxydante de l'huile essentielle de *Tetraclinis articulata* est déterminé selon le protocole expérimental de Nogala-Kalucka et al., (2010). Un volume de 1 mL d'huile essentielle est incorporé à 3 mL de méthanol et 1 mL de DPPH préalablement préparée en solubilisant 0,012 g dans 100 mL de méthanol. Après incubation à l'obscurité et à température ambiante pendant 15 min, l'absorbance est mesurée par un spectrophotomètre à 517 nm.

Le pourcentage d'inhibition, calculé comme suit, est couramment utilisé pour évaluer et comparer l'efficacité de divers antioxydants (Dung et al., 2008).

$$\text{Pourcentage d'inhibition (\%)} = \frac{\text{Abs Contrôle} - \text{Abs échantillon}}{\text{Abs Contrôle}} \times 100$$

### III. Résultats et discussion

#### III.1. pH du sol

Les résultats obtenus, avec des valeurs de pH variant entre 7,57 et 7,91, indiquent que le sol présente une réaction alcaline. Selon la classification française, ces valeurs situent le sol dans la classe des sols basiques à très basiques. Le tableau 4 affiche le pH du sol pour chaque exposition ainsi que l'altitude.

**Tableau 4 :** pH du sol et altitude de la zone d'étude

Exposition	Altitude	pH
Nord	896	7.87
Sud	959	7.67
Est	931	7.58
Ouest	902	7.91

#### III.2. Extraction et caractérisation chimique des huiles essentielles de *Tetraclinis articulata*

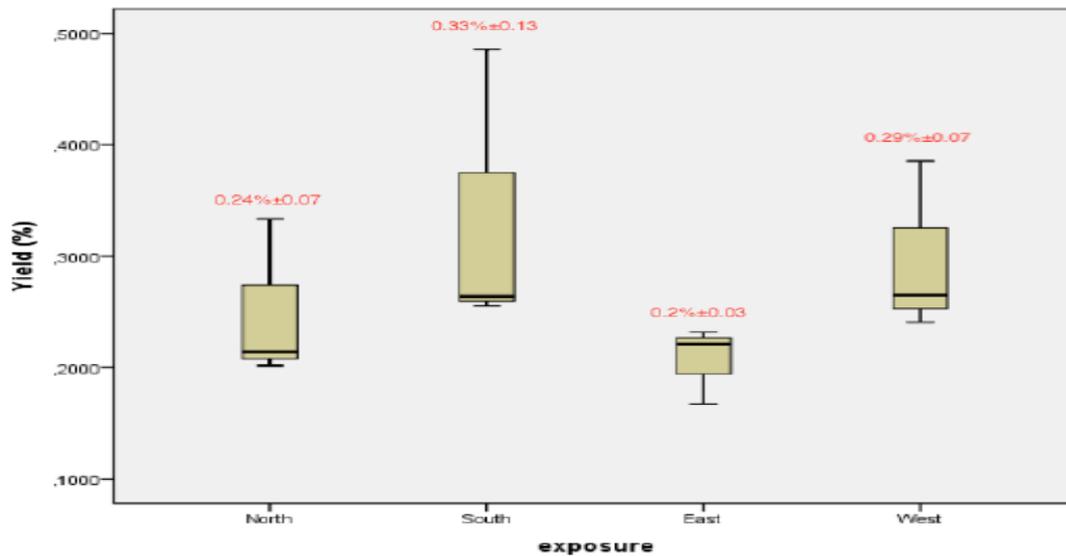
##### III.2.1. Rendement en huile essentielle

Les huiles essentielles de *Tetraclinis articulata* récupérées, présentait une couleur jaune claire, une consistance légèrement liquide à température ambiante et dégageait une odeur balsamique assez prononcée. Nos résultats concordent avec ceux réalisés par **Khatib et al., (2024)**. Cette observation est illustrée dans la figure 23.



**Figure 23 :** Huile essentielle de *Tetraclinis articulata*

La figure 24 représente les différents rendements obtenus en huiles essentielles en fonction des quatre expositions géographiques.



**Figure 24 :** Rendement moyen en huiles essentielles de *Tetraclinis articulata*

Les résultats de la figure 17 ont démontré que le rendement en huile essentielle des différentes expositions est de l'ordre de  $0.33\% \pm 0.13$ ,  $0.29\% \pm 0.07$ ,  $0.24\% \pm 0.07$  et  $0.2\% \pm 0.03$  pour le sud, l'ouest, le nord et l'est, respectivement.

L'analyse de la variance indiquait que l'effet des quatre expositions (Nord, Sud, Est et Ouest) n'est pas significatif sur le rendement en huile essentielle ( $p < 0.05$ ) avec  $F = 1.260$  et  $P = 0.351$

Les travaux menés par **Boufares et al., (2019)**, **Hamdani et al., (2021)** ainsi que **Boussaid et al., (2022)** présentaient une variabilité dans le pourcentage de rendement des huiles essentielles de cette essence récoltée dans trois sites différents d'Algérie, à savoir Tiaret, Chlef et Tlemcen avec des valeurs de 0.6 %, 1.1 % et 0.66 %, respectivement. Egalement, une étude réalisée par **Larabi et al., (2015)** dans la région de Sidi Bel Abbes, a permis de déterminer un faible rendement de 0,11 %.

De même, des rendements dissemblables ont été enregistrés ailleurs : 1.71% en Egypte (**Ibrahim et al., 2017**), 0.4% (**Benjemaa et al., 2022**) et 0,93% (**Benghnaya et al., 2016**) en Tunisie. Alors qu'au Maroc ils étaient différents selon les régions d'origines, à savoir 0,5% à Benslimane précisément dans la plaine d'Ain Dakhla (**Rabib et al., 2020**), 0,61% à Khenifra (Moyen Atlas) (**Zerkani et al., 2019**), 0,56% et 0,36% dans les montagnes et les plaines de Debdou et Ras Elma Tazekka respectivement (**Rabib et al., 2019**).

Notre étude a mis en évidence que *Tetraclinis articulata* présente une variation significative du rendement en huile essentielle selon la région d'origine. Cela peut être confirmé par le travail de **Boussaid et son équipe, (2022)**.

De plus, en comparant nos résultats à ceux obtenus par **Fadel et al., (2019)** sur la fraction volatile d'autres espèces appartenant à la famille des Cupressacées (*Juniperus oxycedrus* avec un taux de 0,02 % et *Cupressus sempervirens* avec 0,01 %), *Tetraclinis articulata* tend à avoir un rendement en huile essentielle plus élevé. Cette variation offre une diversité d'options pour différentes applications en aromathérapie, en parfumerie et en médecine traditionnelle (**Daud et al., 2022**).

Plusieurs facteurs contribuent à la variation de ces rendements, entre autre des facteurs propres à la plante comme l'âge, le stade végétatif et la variabilité **génétique (Bourkhiss et al., 2011 ; Boufares et al., 2019)**. Aussi, la période de récolte (**Zerkani et al., 2019**), les méthodes et la durée du séchage, ainsi que, les techniques d'extraction jouent un rôle important (**Bourkhiss et al., 2009 ; Herzi et al., 2013 ; Zerkani et al., 2019**).

Selon **Hamdani et al., (2021)**, **Boussaid et al., (2022)** et **Laftouhi et al., (2023)**, les conditions climatiques peuvent également favoriser cette variation.

Selon des recherches précédentes, une exposition accrue au soleil peut entraîner une amélioration du rendement de la plante. Ainsi, la modulation de la lumière, en terme d'intensité et de spectre, peut optimiser la production de composés bioactifs et d'huiles essentielles de plantes médicinales, améliorant de cette façon leurs propriétés thérapeutiques (**Zhang et al., 2021**). Cependant, **Milenkovic et al., (2021)** ont rapporté que les huiles essentielles de certaines espèces telles que le Thym, la Marjolaine et l'Origan synthétisent davantage d'huiles essentielles dans des conditions d'ombrage.

### III.2.2. Composition chimique de l'huile essentielle de *Tetraclinis articulata*

L'analyse par CG/MS a permis de mettre en évidence la présence d'environ 89, 93, 89 et 85 molécule chimiques pour les expositions nord, sud, est et ouest représentant 94.45 %, 92.73 %, 98.77 % et 90.84 % de la composition totale de cette huile, respectivement.

Les résultats de la fraction chimique de l'huile essentielle des quatre orientations (nord, sud, est et ouest) sont affichés dans le tableau 5.

**Tableau 5** : Composition chimique (%) de l'huile essentielle des feuilles de *Tetraclinis articulata* provenant de différentes expositions dans des conditions semi-arides

Tr	Composés	Exposition est (%)	Exposition ouest (%)	Exposition nord (%)	Exposition sud (%)
5.8	Santolina triene	0.04	0.08	0.05	0.06
6.75	Tricyclene	1.80	2.13	1.74	1.67
7.12	$\alpha$ -Thujene	0.08	0.15	0.16	0.27
7.5	<b><math>\alpha</math>-Pinene</b>	<b>5.09</b>	<b>4.79</b>	<b>4.97</b>	<b>5.26</b>
8.28	Camphene	1.08	1.64	1.95	1.53
8.6	Thuja-2,4(10)-diene	0.07	0.26	0.36	0.21
10.13	Sabinene	1.80	1.75	2.18	2.20
11.87	$\beta$ -Pinene	4.36	3.13	3.05	3.08
12.72	$\alpha$ -Phellandrene	0.08	0.24	0.19	0.27
14.02	$\alpha$ -Terpinene	0.24	0.38	0.18	0.50
15.03	para- cymene	0.28	1.14	1.04	0.54
15.42	<b>D-Limonene</b>	<b>5.76</b>	<b>5.41</b>	<b>5.03</b>	<b>7.18</b>
18.13	cis-Sabinene hydrate	0.08	0.05	0.04	0.33
18.7	$\gamma$ -Terpinene	0.50	0.65	0.32	0.66
20.16	p-Mentha-3,8-diene	-	-	0.08	0.07
20.42	trans-Linalool (furanoid)	oxide -	-	-	0.17
21.7	$\alpha$ -Terpinolene	0.32	0.94	0.63	1.20
21.8	p-Cymenene	-	-	0.63	-

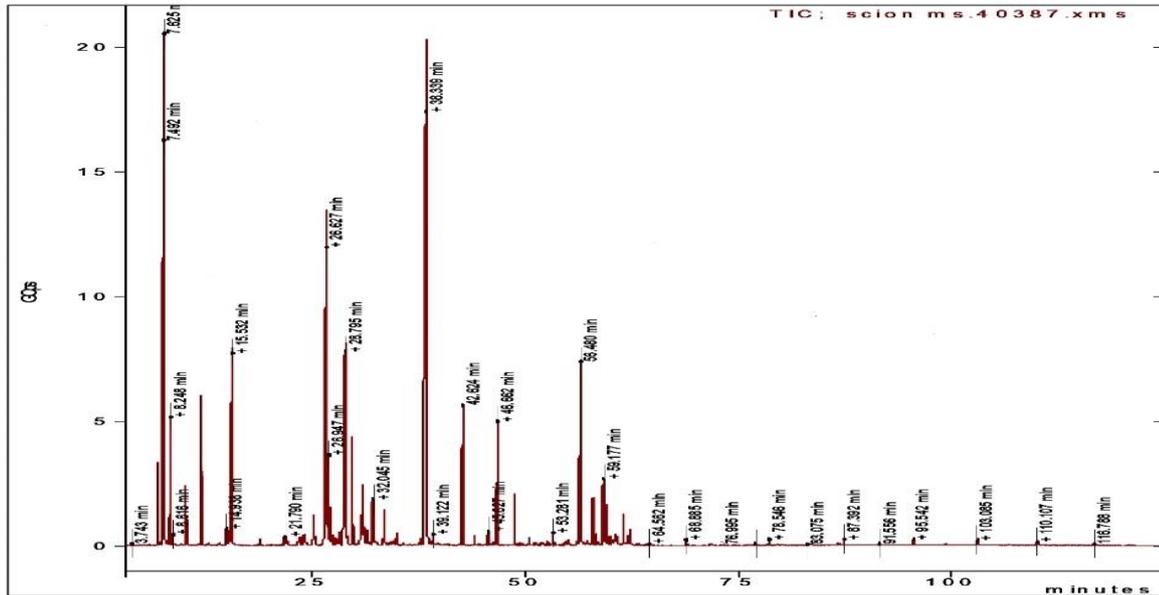
22.04	Camphen-6-one	-	0.00	0.25	0.11
23.41	Linalool	0.86	1.16	0.63	1.37
23.87	1,3,5-p-Menthatriene	0.55	0.57	1.00	0.25
24.06	Endo-Fenchol	-	-	-	0.40
24.89	trans-p-Mentha-2,8-dien-1-ol	0.30	0.23	0.05	0.40
25.13	$\alpha$ -Campholenal	0.20	1.15	1.80	0.27
26.19	Trans-Pinocarveol	0.15	-	-	-
26.5	<b>Camphor</b>	<b>3.01</b>	<b>5.91</b>	<b>7.53</b>	<b>3.69</b>
26.81	camphene hydrate	1.31	2.09	2.98	1.11
27.75	Isoborneol	0.62	-	0.41	0.22
27.95	trans-Pinocamphone	-	-	0.15	0.19
28.12	Pinocarvone	-	-	0.59	0.29
28.72	<b>Borneol</b>	<b>4.93</b>	<b>5.11</b>	<b>5.20</b>	<b>6.26</b>
29.03	<i>p</i> -Mentha-1,5-dien-1-ol	0.25	1.32	0.59	0.28
29.66	Terpin-4-ol	2.07	2.51	3.03	2.02
30.26	trans-1(7),8-p-Menthadien-2-ol	0.24	0.12	0.19	0.27
30.72	p-Cymen-8-ol	0.09	-	1.46	0.50
30.89	$\alpha$ -Terpineol	2.53	-	3.07	2.84
31.32	Myrtenol	0.10	0.76	0.97	0.65
32.07	Verbenone	0.07	0.66	1.55	0.35
32.51	Cymen-9-ol	-	-	0.23	-
32.86	Iso-dihydrocarveol	0.11	0.15	0.15	0.48
33.16	endo-Fenchyl acetate	0.35	0.37	0.17	0.93
33.45	<i>trans</i> -Carveol	0.31	1.14	1.52	0.48
33.73	trans-p-Mentha-1(7),8-dien-2-ol	0.01	0.13	0.16	0.30
34.4	Cis-Carveol	0.16	0.28	0.41	0.27
34.84	Carvone	0.16	0.56	0.63	0.25
35.17	carvacrol methyl ether	0.03	0.06	0.08	0.13
35.65	Carvotanacetone	-	0.00	0.17	0.23
36.52	Iso-3-thujanol acetate	0.10	0.12	0.09	0.17

36.97	perilla aldehyde	0.15	0.18	0.06	0.10
37.72	cis-Verbenyl acetate	0.34	0.18	0.42	0.21
38.08	<b>Bornyl acetate</b>	<b>11.20</b>	<b>9.78</b>	<b>9.14</b>	<b>7.95</b>
39.15	Undecan-2-one	0.26	0.43	0.68	0.42
39.66	cis-Pinocarvyl acetate	0.06	0.11	0.13	0.10
40.86	Myrtenyl acetate	0.55	0.10	0.13	0.08
41.18	linalool propanoate	-	0.08	0.12	0.17
41.7	$\delta$ -Elemene	0.03	0.05	0.04	0.09
42.37	Silphinene	0.04	0.03	0.12	0.00
42.61	$\alpha$ -Terpinyl acetate	2.97	2.62	2.60	2.49
43.24	Neoiso dihydro carveol acetate	-	-	-	0.17
43.7	$\alpha$ -Ylangene	0.04	0.07	-	0.13
43.99	$\alpha$ -Copaene	0.88	0.57	0.48	0.89
44.46	$\beta$ -Bourbonene	0.05	0.12	-	0.12
45.63	$\beta$ -Cubebene	1.52	0.73	0.50	1.12
45.7	$\beta$ -Elemene	0.20	0.23	-	0.87
45.89	Tetradecane	0.04	0.09	0.12	0.08
46.02	N-Methyl anthranilate methyl	-	-	0.14	-
46.45	Methyl eugenol	0.06	0.17	0.14	0.21
46.72	(Z)-Caryophyllene	4.03	2.67	2.51	3.23
47.31	$\alpha$ -Gurjunene	0.14	0.08	0.07	0.50
47.75	$\beta$ -Copaene	0.02	0.09	-	-
48.79	$\alpha$ -Humulene	2.89	1.80	1.49	2.29
49.39	geranyl acetone	0.34	0.32	0.10	0.37
49.68	E- $\beta$ -Farnesene	0.29	0.17	0.11	0.42
50.21	$\gamma$ -Gurjunene	0.14	0.08	0.00	0.15
50.53	Germacrene D	2.71	1.05	0.45	2.34
50.78	cis- $\beta$ -guaiene	0.13	0.10	-	-
51.11	$\delta$ -selinene	0.29	0.37	0.21	0.40

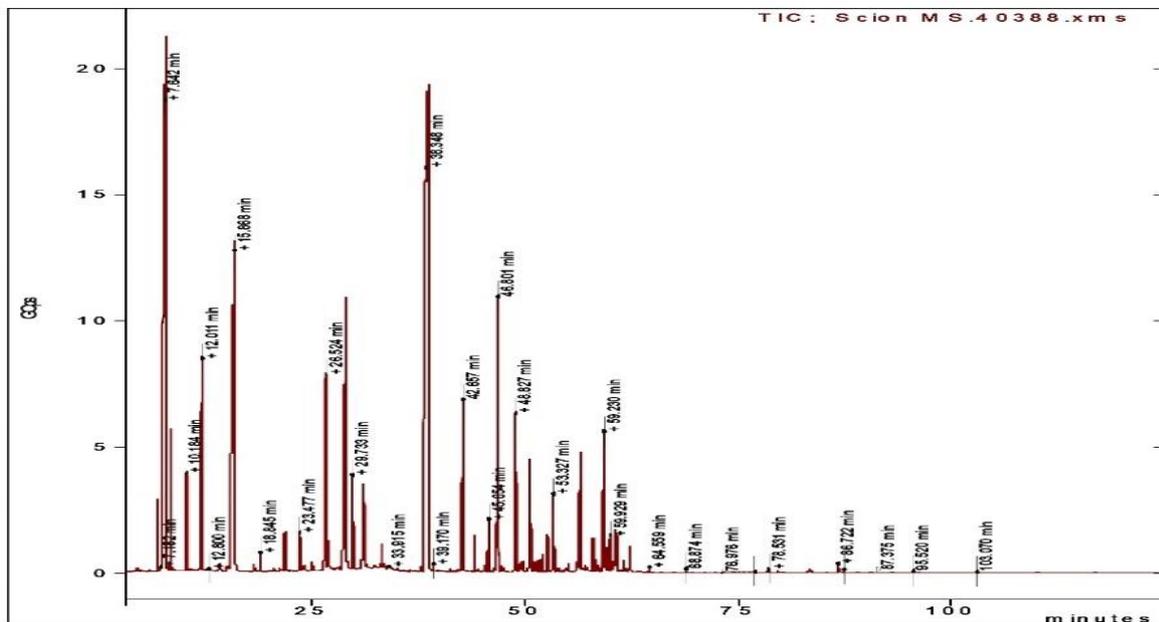
**Partie II****Etude expérimentale**

51.48	$\gamma$ -amorphene	0.29	0.16	0.07	0.49
51.91	$\alpha$ -Muurolene	0.43	0.26	0.16	0.56
52.62	$\gamma$ -Cadinene	0.86	0.46	0.24	1.04
53.32	$\delta$ -Cadinene	2.38	1.02	0.63	1.79
53.7	trans-cadina-1,4-diene	0.15	0.15	-	0.13
53.98	10-Epi-Cubebol	0.21	0.13	-	0.18
54.22	$\alpha$ -Calacorene	0.07	0.09	0.05	0.06
54.88	Elemol	0.04	0.17	0.07	-
55.05	GermacreneB	-	-	0.24	0.37
56.06	(E)-Nerolidol	0.52	0.32	0.27	0.31
57.04	Salvial-4(14)-ene-1-one	0.18	0.45	0.15	0.53
57.97	Humulene epoxide II	3.30	2.31	2.07	1.31
58.31	$\beta$ -Oplopenone	1.10	0.85	0.64	0.57
58.69	(2, 7Z) Bisaboladien-4-ol	0.32	0.38	0.17	0.27
59.22	1-epi-cubenol	5.05	3.17	2.97	2.74
59.61	Caryophylla-4(12),8(13)-dien5 $\alpha$ -ol	1.56	1.11	1.30	0.77
59.97	$\alpha$ -muurolol	3.04	1.25	0.55	1.21
60.27	Z-14-hydroxy caryophyllene	0.61	0.58	0.30	0.37
	$\alpha$ -Cadinol				1.45
60.7		1.57	2.01	1.16	
60.83	14-hydroxy- 9-e pi-(E)-caryophyllene	0.27	-	-	-
61.1	Z- $\alpha$ -Santalol	0.18	-	0.12	0.11
61.6	Eudesma-4(15),7-dien-1 $\beta$ -ol	1.77	1.01	1.01	0.42
61.81	Germacra-4(15),5,10(14)-trien-1- $\alpha$ -ol	2.12	1.83	1.17	0.89
<b>Total</b>		<b>98.77</b>	<b>90.84</b>	<b>94.45</b>	<b>92.73</b>

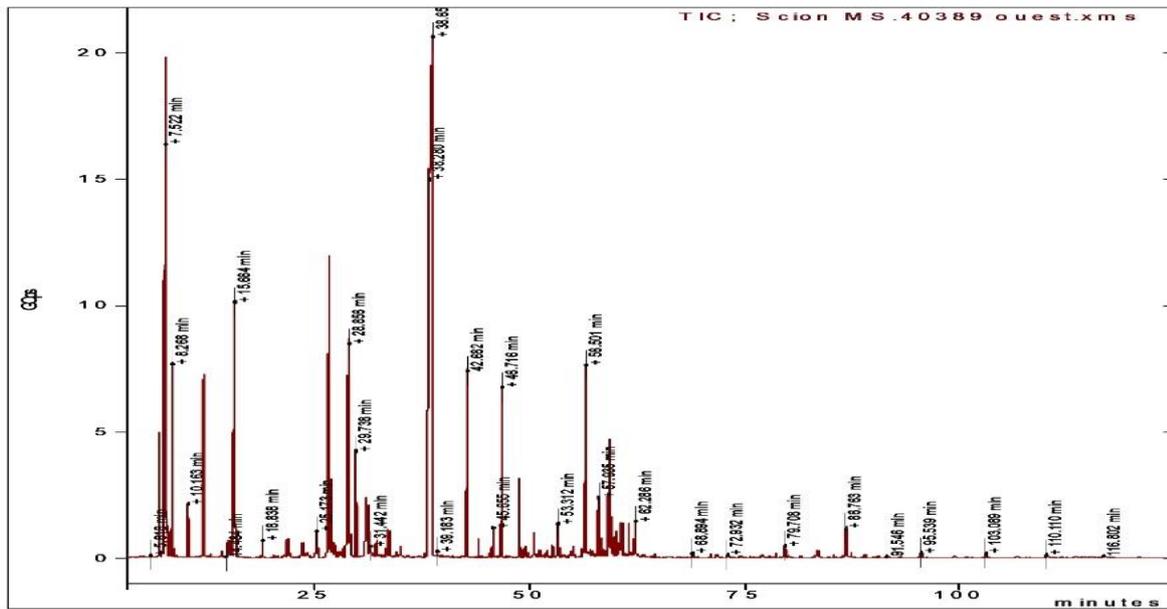
Les chromatogrammes des huiles essentielles de *Tetraclinis articulata* obtenu par GC/MS à partir des différentes expositions sont présentés dans la figure 25.



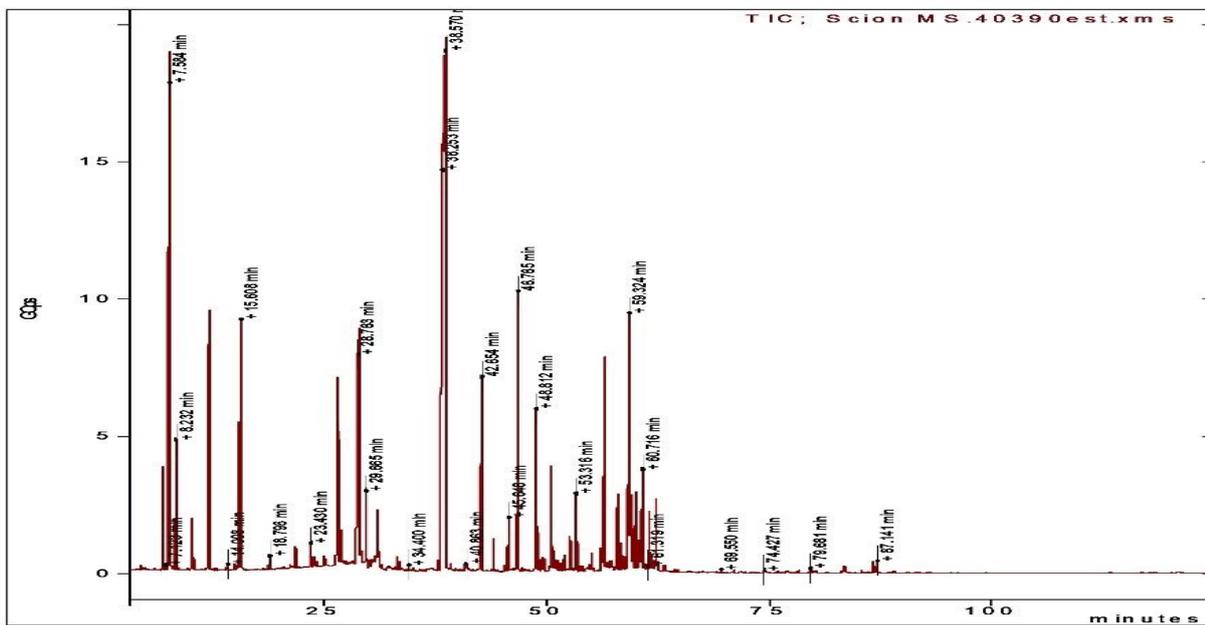
Chromatogramme de l'exposition nord



Chromatogramme de l'exposition sud



Chromatogramme de l'exposition ouest



Chromatogramme de l'exposition est

**Figure 25 :** Chromatogramme des huiles essentielles de *Tetraclinis articulata* obtenu par GC/MS à partir de différentes expositions

Il est important de noter que la composition volatile de cette huile était uniforme sur le plan qualitatif, mais présentait des variations quantitatives.

La fraction organique prédominante des huiles essentielles extraites des feuilles de *Tetraclinis articulata* était représentée par l'Acétate de Bornyl (9.14 %, 7.95 %, 11.20 % et 9.78 %), le Limonène (5.03 %, 7.18 %, 5.76 % et 5.41 %), l' $\alpha$ -Pinène (4.97 %, 5.26 %, 5.09 % et 4.79 %), le Camphre (7.53 %, 3.69 %, 3.01 % et 5.91%) et enfin le Bornéol (5.20 %, 6.26 %, 4.93 % et 5.11 %) respectivement pour le nord, le sud, l'est et l'ouest.

Egalement, il a été noté que la présence du 1-epi-Cubenol (2.97 %, 2.74 %, 5.05 % et 3.17 %), du  $\beta$ -Pinène (3.05 %, 3.08 %, 4.36 % et 3.13 %) et du Z-Caryophyllène (2.51 %, 3.23 %, 4.03 % et 2.67 %) pour les mêmes expositions, était remarquable.

Ces résultats peuvent être comparés à ceux obtenus par l'analyse chromatographique de deux huiles essentielles provenant de différentes régions d'Algérie. Ainsi, à Tiaret, **Boufares et al., (2019)** ont révélé que le Bornyl d'acétate (28.42 %), le Camphre (18.6 %), l' $\alpha$ -Pinène (16.45 %), le Limonène (12.75 %) et le Borneol (8.41 %) étaient les principaux constituants de cette huile, alors que la présence des mêmes constituants était remarquable mais avec des taux différentes à Chlef, où Hamdani et al., (2021) ont trouvé une composition majoritaire de Camphre (28.03 %), d'Acétate de Bornyl (20.5 %), d' $\alpha$ -Pinène (11.34 %), de Limonène (11.09 %) et de Bornéol (8.01 %).

En revanche, **larabi et al., (2015)** ont montré que l'huile essentielle provenant de Sidi Bel Abbes, ville située au nord-ouest de l'Algérie, avait un profil chimique différent, constitué essentiellement de Camphre (19,6 %), d'Acétate de Bornyl (18,7 %), de Germacrène (7,6 %), de Trans-Caryophyllène (7,1 %) et enfin de Bornéol (6,3 %).

Au Maroc, les études menées par **Bourkhiss et al., (2023)** et **El Hachlafi et al., (2024)** sur la fraction volatile des feuilles de TA sont qualitativement similaires aux résultats de la présente étude. La différence résidait dans le taux de chaque élément.

Par contre, en analysant le même organe provenant de la région d'Aguelmous (Province de Khénifra), **Eddabbeh et al., (2021)** ont indiqué la prédominance de l' $\alpha$ -Pinène (29.5%), du Cedrol (19.22 %), de l' $\beta$ -Phellandrène (7.67 %), du Sabinène (5.3 %) et du Bornyl d'Acétate (1.52 %).

**Zerkani et al., (2019)** révèlent, qu'en plus de la présence de l'acétate de Bornyl (38,54 %), de l' $\alpha$ -Pinène (6,71 %) et du Bornéol (3,52 %), l' $\alpha$ -campholénal (5,93 %) et le 1-Epi-Cubénol (3,49 %) étaient parmi les composants majoritaires de cette huile essentielle.

**Ibrahim et al., (2017)** ont rapporté que la composition de l'huile essentielle récupérées de la partie aérienne de *Tetraclinis articulata* localisé à Gizeh en Égypte était caractérisée par une fraction totalement différente. Riche en Camphor (21.23 %) et Bornyl d'Acétate (15.03 %) mais pauvre en  $\alpha$ -Pinène (5.92 %), cette huile est également composée de Fenchol, de Fenchone et d'Isobornyl Acétate avec des taux de 13.85 %, 9.48 % et 8,39%, respectivement.

En Tunisie, les études conduites par **Benjemaa et al., (2022)** ont souligné que l'huile essentielle de *Tetraclinis articulata* était prédominée par le Camphre avec un taux de 22,4% (*Tetraclinis articulata* et Camphre). Cependant, **Benghnaya et al., (2016)** ont démontré que l' $\alpha$ -Pinène (56,21 %), l'Isobornyl d'acétate (7,46 %) et le  $\beta$ -mycrène (3,08 %) étaient les constituants dominants de cette huile. D'autre part, les résultats obtenus par **Harzi et al., (2013)** ont révélé que le profil chimique était majoritaire par l' $\alpha$ -Pinène (24,9 %), l'acétate de Linanol (21,44 %) et l'oxyde de Caryophyllène (4,24 %).

Des études antérieures rapportent que la diversité dans la composition chimique des huiles essentielles résulte de différents facteurs, notamment le moment de la récolte, le mode d'extraction, le génotype et le cycle biologique (**Boussaid et al., 2022**), le temps de séchage (**Zatout et al., 2022 ; El Hachlafi et al., 2024**) et l'origine géographique de la plante (**Rabib et al., 2019 ; Khatib et al., 2024**).

De plus, l'adaptation du Thuya à différentes conditions telles que l'altitude, le climat et le sol peut contribuer à la biosynthèse de certaines molécules chimiques (**Ben Ghnaya et al., 2016 ; Zerkani et al., 2019 ; Khalil et al., 2020**).

Cette présente étude, démontre que la variabilité de la concentration des composés volatils dans les huiles essentielles pourrait être attribuée à la quantité de lumière reçue des expositions géographiques. En effet, des études récentes, indiquent que la lumière et la durée d'ensoleillement (la durée de la journée) contribuent de façon significative à la biosynthèse des terpènes, qui sont considérés comme des constituants de senteur des huiles essentielles (**Boukhatem et al., 2010 ; Wei et al., 2023**).

Le tableau 6 présente les composés chimiques appartenant à la même famille (définissant ainsi 22 familles) (<https://www.nist.gov> ; <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>) où le pourcentage pour les expositions nord, sud, est et ouest était calculé par rapport à la totalité des composés.

**Tableau 6 :** Taux de composés chimiques des différentes familles dans les huiles essentielles de *Tetraclinis articulata* en fonction des expositions

Familles	Composés chimiques	Expositions (%)			
		Nord	Sud	Est	Ouest
Thuyene	$\alpha$ -thuyene ; sabinene ; cis-sabinene hydrate ; thuya-2,4(10)	2.99	3.42	2.15	2.56
Pinene	$\alpha$ -pinene ; $\beta$ -pinene, verbenone	10.13	9.37	9.63	9.44
Camphene	Camphene ; camphen-6-on ; $\alpha$ -campholenal ; camphor ; camphene hydrate ; trans-pinocamphene	15.52	7.44	5.66	11.87
Terpinene	$\alpha$ - terpinene ; $\gamma$ - terpinene ; $\alpha$ -terpinolene ; terpin-4-ol ; $\alpha$ -terpinéol ; $\alpha$ -terpinyl-acétate	10.4	10.47	8.73	7.81
Menthol	trans-p-mentha-2,8-dien-1-ol ; p-mentha-1,5-dien-1-ol ; trans-1(7), 8-p-menthadien-2-ol ;	1.04	1.34	0.8	1.98
Phellandrene	$\alpha$ -phellandrene	0.2	0.29	0.08	0.26
Menthene	p-mentha-3,8-diene ; 1,3,5-p-menthatriene	1.14	0.34	0.55	0.62
Myrtenol	myrtenol ; myrtenyl-acetate	1.16	0.78	0.55	0.94
Cymene	Para-cymene ; P-cymenene ; P-cymen-8-ol ; cymen-9-ol	3.55	1.12	0.37	1.25
Carvone	Trans-pinocarveol ; pinocarvone ; iso-dihydrocarveol ; trans-carveol ;	3.67	2.15	0.9	2.34

Linalool	Trans-linalool oxyde ; linalool ; linalool propanoate	0.79	1.84	0.87	1.36
Fenchol	Endo-fenchol ; endo-fenchyl acetate	0.17	1.43	0.35	0.4
Borneol	Iso-borneol ; bornyl acetate ; borneol	15.61	15.56	1,95	16.39
Limonene	D- Limonene	5.32	7.74	5.83	5.95
Copaene	$\alpha$ -copaene ; $\beta$ -copaene	0.5	0.95	0.91	0.72
Elemene	$\delta$ -elemene ; $\beta$ -elemene ; elemol	0.11	1.03	0.27	0.49
Caryophyllene	(Z) caryophyllene ; Caryophyllene oxide ; caryophylla-4(12), 8(13)-dien 5 $\alpha$ -ol ; Z-14-hydroxy	12.05	11.18	16.18	13.43
Gurjunene	$\alpha$ - Gurjunene ; $\gamma$ - Gurjunene	0.07	0.7	0.28	0.17
Germacrene	Germacrene D ; Germacrene B ; Germacra-4(15),5,10(14)-trien-	1.96	3.88	4.89	3.17
Muurolene	$\alpha$ - Muurolene ; $\alpha$ - Muurolol	0.75	1.9	3.51	1.66
Cadinene	$\gamma$ -cadinene ; $\Delta$ -cadinene ; trans-cadina-1-4-diene ; $\alpha$ -cadinol	2.14	4.75	5.02	4.00
Cubenol	10-epi-cubenol ; 1-epi-cubenol	3.14	3.14	5.32	3.63

Les principales familles identifiées sont clairement mentionnées dans le tableau 04. Ces familles présentent une variation qualitative et quantitative en fonction des différentes expositions. Ainsi :

- L'exposition nord est constituée par les familles Bornel (15.61 %), Camphène (15.52 %) et Caryophyllène (12.05 %)
- L'exposition sud est dominé par la famille Bornéol (15.56 %), Caryophyllène (11.18 %) et Terpinène (10.47 %)
- L'exposition est regroupe les familles Bornéol (16.95 %), Caryophyllène (16.18 %) et Pinène (9.63 %)
- L'exposition ouest est dominée par les familles Bornéol (16.39 %), Caryophyllène (13.43 %) et Camphène (11.87 %).

### III.3. Relation : paramètres environnementaux- rendement- composition chimique des huiles essentielles de *Tetraclinis articulata* par l'Analyse Factorielle de Données Mixtes (PCAmix)

Pour étudier l'effet des paramètres environnementaux (altitude, pH du sol et exposition) sur le rendement, la nature et la répartition des composés chimiques des huiles essentielles de *Tetraclinis articulata*, une Analyse Factorielle de Données Mixtes (PCAmix) a été réalisée.

Elle consiste à traiter simultanément des données mixtes (quantitatives et qualitatives), en utilisant le logiciel Xlsat 2019.

La PCAmix est une méthode similaire à l'Analyse en Composantes Principales d'un ensemble d'observations, qui combine des variables qualitatives et quantitatives. Elle inclut l'Analyse en Composantes Principales ordinaire (ACP), et l'Analyse des Correspondances Multiples (MCA), selon des cas particulier (**Hill et Smith, 1976 ; Escofier, 1979 ; Pages, 2004 ; Chavent et al., 2014**).

Le résultat de La PCAmix est présenté dans 04 graphes (Figure 25) :

1. Cercle de corrélation (Graph : A) : Corrélations entre les composantes et les variables initiales
2. Carte des modalités (Graph : B) : Coordonnées principales des modalités de pH, de rendement et d'exposition
3. Graphique mixte (Graph : C) : Représentant les chargements au carré (coefficient de saturation au carré) des variables quantitatives et qualitatives.
4. Graphique des modalités Altitude (Graph : D)

Deux axes sont susceptibles d'être interprétés :

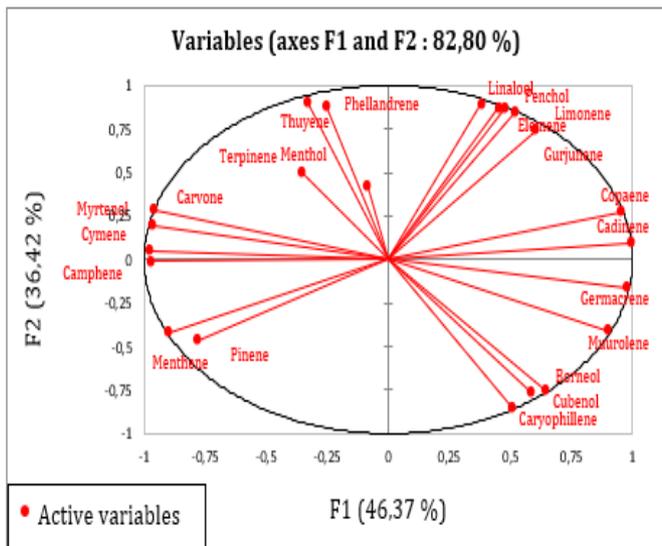
- F1 : représente 46.37 % de nuage de points (où les informations peuvent être expliquées dans cette dimension).
- F2 : représente 36.42 % de nuages de points qui peuvent être expliqués dans cet axe.

Les graphiques de la figure 26 indiquent les variables quantitatives, les variables qualitatives et leurs liens avec les axes factoriels F1 et F2 :

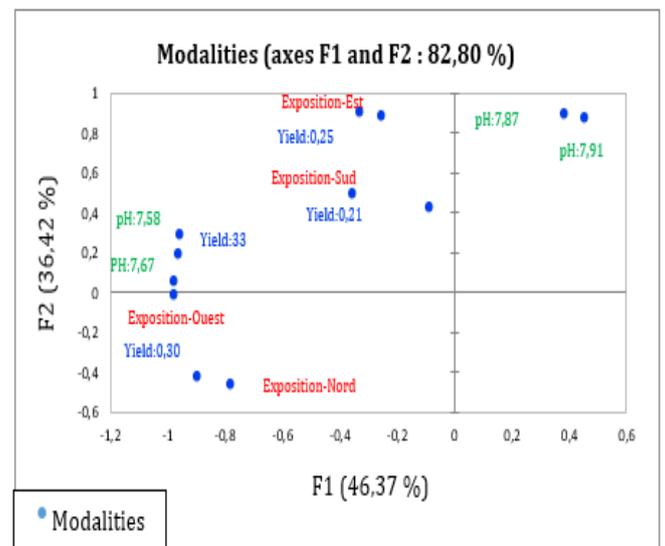
- L'axe 1 était fortement corrélé négativement avec les variables suivantes : Thuyène, Pinène, Camphène, Terpinène, Menthol, Phellandrène, Menthène, Myrténol, Cymène et Carvone. Les valeurs de rendement les plus élevées ont été trouvées dans les expositions nord et l'exposition ouest, avec des valeurs de pH de 7.58 et 7.67 et une altitude de 896 m.

Du côté positif, les molécules suivantes : Linalool, Fenchol, Bornéol, Limonène, Copaène, Elemène, Caryophyllène, Gurjunène, Germacrène, Muurolène, Cadinène et Cubéol correspondaient à des valeurs de pH de 7.87 et 7.91 et à une altitude de 931 et 959 m.

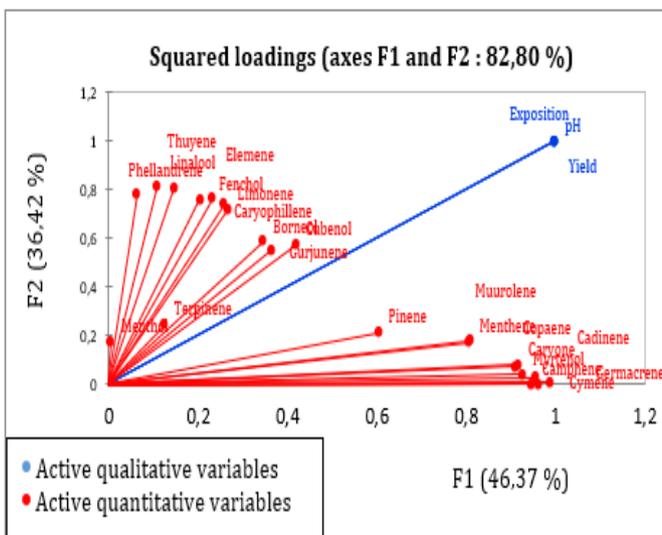
- Sur l'axe 2, les variables Phellandrène, Linalool, Fenchol, Limonène, Elemène et Gurjunène étaient corrélées positivement avec cet axe. Cela veut dire que ces compositions d'huiles essentielles avaient des valeurs significatives dans les expositions est et sud.



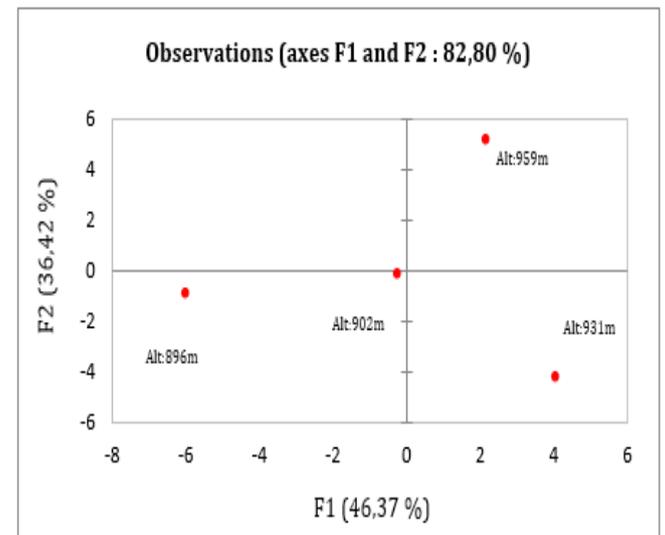
Graph A



Graph B



Graph C



Graph D

**Figure 26 :** Paramètres du milieu- rendement- composition chimique des huiles essentielles de *Tetraclinis articulata* obtenues par l'Analyse Factorielle de Données Mixtes (PCAmix)

L'analyse des graphes montre que le pH semble influencer la production de certains composés volatils, les pH plus élevés favorisant certains profils chimiques. L'exposition géographique, notamment Est et Sud, est également associée à des groupes de molécules spécifiques, probablement en lien avec l'ensoleillement et la température.

Concernant l'altitude, les sites situés plus en hauteur présentent une composition chimique différente de ceux à basse altitude, ce qui pourrait s'expliquer par des conditions climatiques particulières influençant la biosynthèse des huiles essentielles.

D'ensemble, cette ACP mixte suggère que la composition chimique des huiles essentielles de *Tetraclinis articulata* est relativement stable et peu influencée par les facteurs environnementaux étudiés. Cette faible variabilité pourrait s'expliquer par une altitude modérément élevée dans les zones de prélèvement, limitant ainsi l'impact des variations écologiques. Malgré tout, cette approche demeure un outil utile pour mieux comprendre les tendances de composition et pourrait contribuer à une valorisation ciblée des huiles essentielles en fonction de leurs propriétés bioactives.

Selon **Fernández-Sestelo & Carrillo (2020)** et **Neffar & Benabdrrahmane (2013)**, les populations végétales provenant de différentes expositions peuvent présenter une composition majoritaire complètement diversifiée. Ainsi, les travaux réalisés par **Guerroudj et al., (2021)** sur les huiles essentielles de baies de *Juniperus oxycedrus* montrent que l'altitude et l'exposition géographique ont un effet significatif sur sa quantité et sa qualité.

Les variations d'altitude dans la zone de récolte peuvent impacter la production de composés actifs (**Dizajeyekan et al., 2016 ; Ghavam et al., 2021; Loya et al., 2023**). Les résultats de **Boussaid et al., (2015)** ont révélé que le rendement en huiles essentielles des feuilles et des fleurs de *Tetraclinis articulata* n'est pas influence par la variation d'altitude.

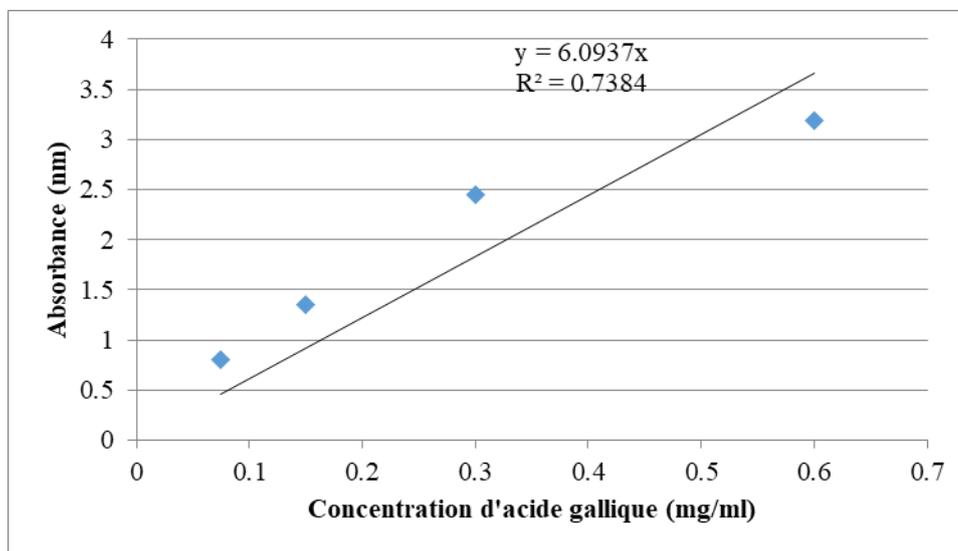
Le *Tetraclinis articulata* prospère généralement dans des conditions légèrement basiques, avec un pH entre 7.5 à 8.9 (**Azzaoui et al., 2017**), le pH est donc un autre facteur influençant la qualité et la quantité des huiles essentielles. Une étude menée par **Diomonde et al., (2014)** sur la relation entre le sol et la composition chimique de *Lippia multiflora* indique qu'il existe peu de lien significatif entre le pH et les constituants de son huile essentielle.

L'acétate de bornyle, principal composant de l'huile essentielle de *Tetraclinis articulata*, a une valeur significative dans le domaine pharmaceutique pour ses propriétés anti-inflammatoires et neuroprotectrices (**Lee et al., 2023 ; Yang et al., 2014**). En raison de sa forte concentration dans l'exposition est, et pour extraire une huile essentielle efficace, il est important de se concentrer sur les parties orientées vers ce côté.

### III.4. Taux des polyphénols totaux

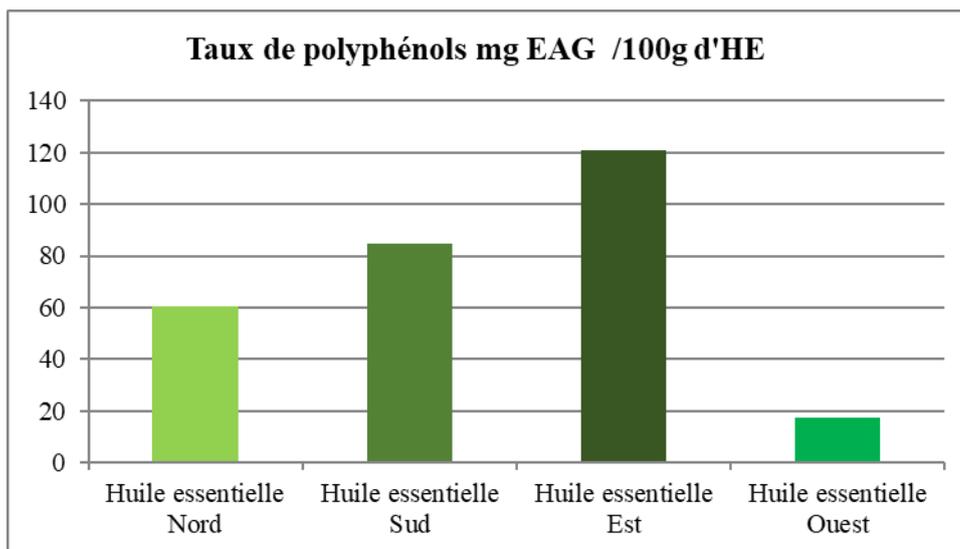
Les polyphénols sont des composés naturels synthétisés exclusivement par les plantes. Ils et sont reconnus pour leurs pouvoir bioactifs, notamment pour moduler le stress oxydatif et inflammatoire (Bertelli et al., 2021). Ils sont également connus pour leurs effets protecteurs contre diverses maladies chroniques, telles que le diabète, le cancer et les maladies cardiovasculaires (MCV) (Antony et Farid, 2022).

La concentration en polyphénols des huiles essentielles de *Tetrcalinis articulata* a été déterminée par la méthode de Folin-Ciocalteu en se référant à la courbe d'étalonnage de l'acide gallique comme standard (Figure 27).



**Figure 27 :** Courbe d'étalonnage des polyphénols par l'acide Gallique

Le graphique de la figure 28 présente les concentrations de polyphénols (exprimées en mg d'équivalent acide gallique (EAG) par 100 g d'huile essentielle) pour les huiles essentielles de TA provenant de quatre expositions différentes : Nord, Sud, Est et Ouest.



**Figure 28 :** Proportion de polyphénols totaux des huiles essentielles de *Tetractinis articulata* selon les expositions géographiques

Avec environ 121.05 mg EAGs/100 g HE, l'huile essentielle de l'exposition est à la concentration la plus élevée en polyphénols, alors que celle du sud atteint environ 84.84 mg EAGs/100 g he, ce qui la place en deuxième position. Les huiles essentielles provenant des expositions nord et ouest affichent des niveaux de polyphénols plus faibles avec des teneurs de 60.23 mg EAGs/100 g HE et 17.57 mg EAGs/100 g HE respectivement.

Par rapport aux données rapportées dans la littérature pour cette espèce, la teneur en composés phénoliques totaux observée dans nos échantillons est nettement inférieure à celle obtenue par **Bourkhiss et al. (2010b)**, avec 320.45 mg d'équivalents d'acide gallique par g d'huile essentielle, et également à celle de **Djouahri (2013)**, où la quantité de polyphénols détectée était largement supérieure dans l'huile essentielle obtenue par HD-MO (370.45 µg GAEs/mg) par rapport à celle obtenue par HD (12.34 µg GAEs/mg).

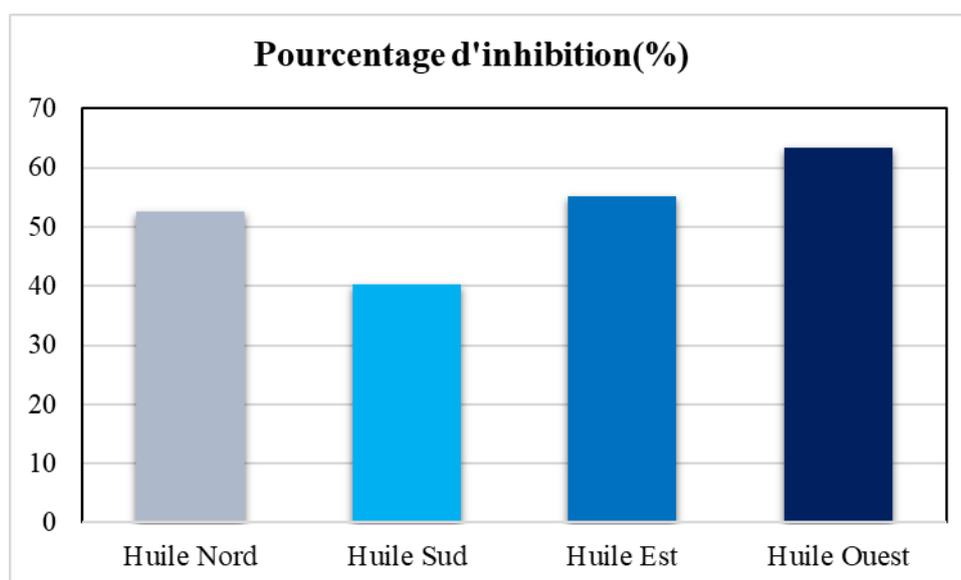
Les travaux réalisés par **Benoutman et al., en 2024**, indiquent qu'il existe une différence significative entre la teneur des PPT des extraits méthanoliques, acétoniques et de l'huile essentielle de *Tetraclinis articulata*. Ainsi, la quantité des composés phénoliques dans l'extrait méthanolique était de l'ordre de 125.75 µg GAEs/g d'extrait, alors qu'elle était de l'ordre de 113.63 µg GAEs/g d'extrait pour le concentré acétonique. Tandis que l'HE présentait une valeur très faible de 5.03 µg GAEs/g d'HE.

Les variations dans les taux de polyphénols peuvent varier en fonction de l'espèce, des facteurs environnementaux (altitude, exposition solaire, température), climatiques et génétiques (de **Medeiros Gomes et al., 2021 ; Saada et al., 2021 ; Jurčević Šangut et Šamec, 2024**).

### III.5. Activité antioxydante

Les tests antioxydants in vitro sont développés dans le but d'imiter les réactions d'oxydoréduction communes dans les systèmes biologiques vivants et sont employés afin d'évaluer les capacités antioxydantes de différents échantillons chimiques et biologiques (**Amiri, 2012**). Le plus couramment utilisé de ces tests est celui employé dans la présente étude : test DPPH (2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl).

La figure 29 démontre les résultats de l'activité antiradicalaire des huiles essentielles des feuilles de *Tetraclinis articulata*, exprimés en pourcentage d'inhibition du radical DPPH.



**Figure 29 :** Pourcentage d'inhibition de l'huile essentielle de *Tetraclinis articulata* en fonction des expositions géographiques

Nos résultats démontrent que l'huile essentielle présentant le plus grand pourcentage d'inhibition est celle de l'exposition ouest avec 63.35 % contre 55.13 %, 52.69 % et 40.39 % pour les expositions est, nord et sud respectivement. Ces taux sont représentatifs d'une inhibition du DPPH, ce qui se manifeste par une décoloration du DPPH du violet en jaune clair. En effet, ces huiles essentielles présentent une activité antioxydante modérée, oscillant de 40 % à 67 %, qui fluctue en fonction de l'exposition géographique.

Une étude antérieure, menée par **Bourkhiss et al., (2010b)** peut confirmer nos résultats. Ainsi, l'huile essentielle des feuilles récoltées dans la région de Khemisset dans le plateau central marocain présente une activité antioxydante assez importante (89.3 %). Cette même étude montre que les huiles extraites du tronc et des rameaux réduisent la concentration du DPPH (95.8 % et 84.6 % respectivement). Selon le même auteur, cette activité est attribuée à la richesse de l'HE en composés phénoliques avec une teneur notable de l'ordre de 320.45 mg d'équivalent d'acide gallique par g d'huile essentielle.

Un travail similaire a été réalisé par **Djeddi et al., (2015)** en déterminant la teneur phénolique totale et l'activité antioxydante de l'huile essentielle et des extraits de *Thymus numidicus* Poiret. Les résultats obtenus démontrent que l'huile essentielle est riche en polyphénols avec 965.60 mg GAEs/g d'extrait suivie de l'extraits méthanol-eau, l'extrait méthanolique, de l'extrait dichlorométhanoliques et enfin l'extrait infusé (513.40 60 mg GAEs/gram d'extrait, 377.40 mg GAEs/gram d'extrait, 321.98 GAEs/gram d'extrait et 53.04 GAEs/gram d'extrait respectivement). Par contre, la réactivité antiradicalaire de l'huile essentielle était faible ( $22.06 \pm 3.07$  %) par rapport au contrôle positif BHT ( $76.13 \pm 3.68$  %) et aux extraits polaires méthanol-eau ( $92.10 \pm 0.55$  %) et méthanol ( $88.40 \pm 1.82$  %).

Les polyphénols ont la capacité d'agir en tant qu'antioxydants, principalement grâce aux groupes phénoliques qui peuvent fournir des électrons dans leurs structures (**Bié et al., 2023**).

Par ailleurs, **Chikoune et al., (2013)** ont souligné que la capacité de piégeage du radical DPPH des huiles essentielles de *Tetraclinis articulata* issues de deux régions d'Algérie était faible comparée aux standard BHT ( $91.1 \pm 0.1$  %) et BHA ( $93.5 \pm 0.1$  %). Les pourcentages d'inhibition variaient avec l'augmentation des concentrations. Des taux allant de  $7.9 \pm 0.2$  % à  $11.6 \pm 1.0$  % étaient enregistrés à Hammam Melouan, tandis que cela variait de  $2.4 \pm 0.4$  % à  $5.3 \pm 0.5$  % à Tipaza.

La valeur d' $CI_{50}$  désigne la concentration minimale requise pour 50 % de réactivité. Plus l' $IC_{50}$  est faible plus l'activité est élevée (**Dung et al., 2000**).

Ainsi, les résultats obtenus par **Djouahri (2013)** ont indiqué que les HE provenant des feuilles extraites par la technique d'hydrodistillation assistée par micro-ondes (HD-MO) ont enregistré le meilleur indice  $CI_{50}$  ( $191.72 \pm 0.25 \mu\text{g/ml}$ ) que celles extraites par hydrodistillation (HD) avec une  $CI_{50}$  de l'ordre de  $339.19 \pm 1.01 \mu\text{g/ml}$ . Ces résultats restent largement inférieurs à celui du composé standard : l'Acide ascorbique ( $CI_{50} = 31.64 \pm 0.13 \mu\text{g/ml}$ ) et l' $\alpha$ -tocophérol ( $CI_{50} = 33.51 \pm 0,15$ ). En effet, il a été conclu qu'il existe une corrélation entre le taux de polyphénols et l'activité antioxydante des huiles essentielles.

Après leur étude en 2013, **Djouahri et al., (2015)** informent sur l'influence de la région de récolte et de l'organe utilisé sur l'activité antioxydante des huiles essentielles des feuilles et du bois de *Tetraclinis articulata* récoltés dans différentes régions d'Algérie, à savoir : Ain Defla, Bordj-Bou-Argeridj, Djelfa et Batna. Les concentrations inhibitrices obtenues étaient plus faibles que les standards (BHA :  $CI_{50} = 24.73 \pm 0.11 \mu\text{g/mL}$  ; BHT :  $CI_{50} = 33.89 \pm 0.16 \mu\text{g/mL}$ ), elles variaient de  $88.44 \pm 3.27$  à  $119.44 \pm 5.25 \mu\text{g/mL}$  pour le bois et de  $113.47 \pm 4.19$  à  $252.49 \pm 6.14 \mu\text{g/mL}$  pour les feuilles. Les faibles activités pourraient être causées par l'absence du carvacrol et du thymol, qui selon certains auteurs, pourraient avoir une grande importance (**Tepe et al., 2005**).

De même, **El Hachlafi et al., (2024)** ont trouvé une  $CI_{50}$  de  $432.72 \pm 1.51 \mu\text{g/ml}$  qui, malgré la puissance antioxydante remarquable de l'huile essentielle de TA, cette activité demeure inférieure à celle des antioxydants synthétiques BHT et l'acide ascorbique.

En contrepartie, **Herzi et al., (2013)** ont rapporté une  $CI_{50}$  élevée ( $3681 \pm 69 \mu\text{g/ml}$ ), reflétant ainsi une faible activité antioxydante. Ces résultats sont similaires aux travaux conduits par **Rabib et al., (2020)** et **Sliti et al., (2016)**.

**Elidrissi et al., (2023)** ont signalé que la variation de l'activité de piégeage des radicaux DPPH de l'huile essentielle de *Juniperus oxycedrus* est due à la composition chimique de chaque huile essentielle.

La présence importante de monoterpènes ( $\alpha$ -pinène, acétate de bornyl et camphre) pourrait expliquer en partie les propriétés antioxydantes de l'huile essentielle de *Tetraclinis articulata*. Ces composés sont décrits comme des potentiels antioxydants, qui ont la capacité de piéger et de réduire les radicaux (El Hachlafi et al., 2024 ; Hou et al., 2020 ; Khatib et al., 2024).

Selon Miladi et al. (2013), les huiles essentielles contenant des composés oxygénés ont généralement une activité antiradicalaire plus élevée que celles contenant des terpènes hydrocarbonés. Alors qu'El Hachlafi et al., (2024), rapportent que l'interaction entre les différents composés de l'huile essentielle influence non seulement la concentration, mais également les interactions potentielles entre les différents composants.

Deux essences appartenant à la famille des Cupressacées avaient fait l'objet d'une étude sur l'activité antioxydante de leurs huiles essentielles. D'après Asbadou et al., (2024), le potentiel antioxydant des huiles essentielles de *Tetraclinis articulata* et de *Juniperus phoenicea* présentaient une bonne activité antiradicalaire mais moins efficace que le contrôle de références l'acide ascorbique, avec des pourcentages d'inhibition du DPPH de l'ordre de  $82.50 \% \pm 1.72$ ,  $80.58 \% \pm 1.6 \%$  et  $91.07 \% \pm 0.98$  respectivement. Il est observé que l'huile la plus efficace est celle de TA avec une  $CI_{50}$  de  $266.9 \pm 5.4 \mu\text{g/mL}$ , alors que l'huile de JP présentait une  $CI_{50}$  de  $332.8 \pm 6.1 \mu\text{g/mL}$ , toutes deux inférieures à l'acide ascorbique ( $CI_{50} = 15.89 \pm 1.4 \mu\text{g/mL}$ ).

Selon le même auteur, il est important de noter que la composition chimique des huiles essentielles de TA, riche en camphre (28.48 %), en acétate de bornyle (18.91 %), en bornéol (14.83 %), en méthylinoléate (9.02 %) et en  $\alpha$ -pinène (7.44 %), ainsi que celle de l'huile essentielle de JP renfermant une grande quantité d' $\alpha$ -pinène (59.51 %) pourrait être à l'origine de cette variation, sachant que l' $\alpha$ -pinène possède une activité antioxydante peu intense. Ainsi, l'association d'autres composés expliquent probablement l'activité de ces huiles.

**Conclusion**

**Et**

**Perspectives**

### Conclusion

Les plantes médicinales demeurent une source fiable de principes actifs, reconnues pour leurs propriétés thérapeutiques. Leur utilisation ne cesse de croître en raison de la toxicité et des effets secondaires indésirables associés aux molécules synthétiques.

La flore algérienne est riche et diversifiée, constituant un patrimoine végétal unique en raison de la diversité de ses climats, de ses reliefs et de ses écosystèmes, ce qui favorise une biodiversité exceptionnelle, avec de nombreuses espèces endémiques et médicinales, représentant un intérêt tant écologique qu'économique.

*Tetraclinis articulata* occupe une place importante dans la végétation de l'Algérie, tant sur le plan écologique que pour ses nombreuses applications médicinales. Ce conifère est reconnu pour la production d'une huile essentielle aux propriétés thérapeutiques intéressantes. Utilisée en médecine traditionnelle pour ses effets antimicrobiens, antioxydants, et anti-inflammatoires, *Tetraclinis articulata* fait l'objet de nombreuses études scientifiques pour exploiter son potentiel dans divers secteurs comme la pharmacologie et la cosmétique.

Dans le cadre de la valorisation de cette huile essentielle, il est important d'impliquer plusieurs approches qui tirent parti de ses propriétés uniques. Ainsi, l'identification de son profil chimique, la détermination de ces activités biologiques permettent une valorisation impliquant une approche intégrée entre la recherche scientifique, l'exploitation industrielle, et la préservation écologique, visant à tirer parti de ses propriétés tout en assurant son utilisation durable et responsable.

L'extraction par hydrodistillation des huiles essentielles des feuilles de *Tetraclins articulata* du massif de Sdama Chergui, wilaya de Tiaret, a présenté des taux variables de 0.33 %  $\pm$  0.13, 0.29 %  $\pm$  .07, 0.24 %  $\pm$  0.07 et 0.2 %  $\pm$  0.03 pour les expositions le sud, l'ouest, le nord et enfin l'est respectivement.

L'analyse par chromatographie gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC/MS) a permis de mettre en évidence la présence de 89, 93, 89 et 95 molécules chimiques qualitativement semblables, mais présentant des quantités variables, pour les expositions nord, sud, est et ouest respectivement.

Cette composition est majoritaire de monoterpènes, à savoir l'acétate de Bornyl (9.14 %, 7.95 %, 11.20 % et 9.78 %), le limonène (5.03 %, 7.18 %, 5.76 % et 5.41 %), l' $\alpha$ -pinène (4.97 %, 5.26 %, 5.09 % et 4.79 %), le camphre (7.53 %, 3.69 %, 3.01 % et 5.91%) et enfin le bornéol (5.20 %, 6.26 %, 4.93 % et 5.11 %) respectivement pour le nord, le sud, l'est et l'ouest.

L'Analyse en Composantes Principales Mixte (PCAmix), est une méthode statistique utilisée pour analyser des jeux de données qui contiennent à la fois des variables quantitatives et qualitatives, a révélé que les résultats obtenus suggèrent que les facteurs environnementaux tels que le pH du sol, l'exposition géographique et l'altitude influencent de manière variable le rendement et la composition chimique des huiles essentielles de *Tetraclinis articulata*. Si certaines variations peuvent être attribuées à des conditions écologiques spécifiques, d'autres composés semblent relativement stables, témoignant d'une certaine constance biochimique de l'espèce. Cette compréhension des interactions entre environnement et production de métabolites volatils constitue une base précieuse pour l'optimisation des conditions de valorisation des huiles essentielles en fonction de leurs propriétés bioactives.

Le dosage des polyphénols totaux des huiles essentielles des quatre expositions permet de conclure que cette huile n'est pas riche en composés phénoliques.

L'étude du potentiel antioxydant de l'huile essentielle de *Tetraclinis articulata* par le test DPPH a enregistré une bonne activité avec un pourcentage d'inhibition de l'ordre de 66.97 %  $\pm$  0.22, 63.88 %  $\pm$  0.84, 56.15 %  $\pm$  0.07 et 41.23 %  $\pm$  0.07 pour l'ouest, le nord, l'est et le sud respectivement. L'activité antioxydante résulte généralement de la présence de divers composés bioactifs. Ces molécules travaillent en synergie pour neutraliser les radicaux libres et préserver les cellules des dommages causés par l'oxydation.

A partir de ces résultats, de nouvelles perspectives seront intéressantes à suivre :

- Identifier les molécules actives responsables des activités biologiques permet de les extraire et de les utiliser dans différents domaines et permet la réduction de la dépendance aux molécules synthétiques
- Compléter cette étude par d'autres activités biologiques (antibactérienne, inflammatoire, insecticide)
- Approfondir la recherche sur la concentration des polyphénols dans les huiles essentielles qui reste relativement faible par rapport aux extraits végétaux et essayer de nouvelles méthodes d'extraction pour extraire des huiles essentielles enrichies en polyphénols tout en maintenant leur profil chimique intact.
- Identifier les zones géographiques et les paramètres environnementaux optimaux pour obtenir des huiles essentielles de haute qualité et en quantité satisfaisante.

# **Références bibliographiques**

Références bibliographiques

A

**Aboufadel, S., Faraj, C., Aouinty, B., & Mellouki, F. (2023).** Evidence of the toxicity effect of *Tetra- clinis articulata* on the disease vector *Cculex pipiens* from Mohammedia. *European Journal of Pharmaceutical and Medical Research*, 10 (12), 608-617.

**Aćimović, M. (2021).** Essential oils: Inhalation aromatherapy – A review. *Journal of Agronomy, Technology and Engineering Management*, 4 (2), 547-557.

**Adeosun, W. B., & Loots, D. T. (2024).** Medicinal plants against viral infections: A review of metabolomics evidence for the antiviral properties and potentials in plants sources. *Viruses*, 16(2), 218.

**Agarwal, P., Sebghatollahi, Z., Kamal, M., Dhyani, A., Shrivastava, A., Singh, K. K., Sinha, M., Mahato, N., Mishra, A. K. & Baek, K. H. (2022).** Citrus essential oils in aromatherapy: Therapeutic effects and mechanisms. *Antioxidants*, 11(12), 2374.

**Alfadda, A. A., & Sallam, R. M. (2012).** Reactive oxygen species in health and disease. *BioMed research international*, 2012(1), 936486.

**Amiri, H. (2012).** Essential oils composition and antioxidant properties of three thymus species. *Evidence-based Complementary and Alternative Medicine*, 2012(1), 728065.

**Antony, A., & Farid, M. (2022).** Effect of Temperatures on Polyphenols during Extraction. *Applied Sciences*, 12(4), 2107.

**Aruoma, O. I. (1999).** Free radicals, antioxidants and international nutrition\*. *Asia Pacific journal of clinical nutrition*, 8(1).

**Asbabou, A., Hanane, T., Gourich, A. A., Siddique, F., Drioiche, A., Remok, F., Saidi, S., Adadi, I., Khamar, H., Almaary, K. S., Bitew Mekonnen, A., Bourhia, M., Bouzoubaa, A., & Zair, T. (2024).** Phytochemical profile, physicochemical, antioxidant and antimicrobial properties of *Juniperus phoenicea* and *Tetraclinis articulata*: in vitro and in silico approaches. *Frontiers in Chemistry*, 12, 1397961.

**Augustyniak, A., Bartosz, G., Čipak, A., Duburs, G., Horáková, L. U., Łuczaj, W., Majekova, M., Odysseos, A. D., Rackova, L., Skrzydlewska, E., Stefek, M., Stosova, M., Tirzitis, G., Venskutonis, P. R., Viskupicova, J., Vraka, P., & Žarković, N. (2010).** Natural and synthetic antioxidants: an updated overview. *Free radical research*, 44(10), 1216-1262.

**Ayache, F. (2007).** Les résineux dans la région de Tlemcen (Nord-Ouest algérien) : aspects écologiques et cartographie. Mémoire de magistère. *Univ. Tlemcen. Fac. Sciences. Départ. Biologie. Lab. Gest. Ecosystèmes.*

**Azzaoui, M. E., Maatoug, M., & Berrayah, M. (2017).** Phytoecological study of *Tetraclinis articulata* in the woodland of Beni Affene, Sdamas Chergui (Tiaret, Algeria). *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 9 (2), 971-987.

## B

**Baba Aissa, F. (1999).** Encyclopédie des plantes utiles, Flore d'Algérie et du Maghreb. *Librairie moderne*, Algérie.

**Bagnouls, F., & Gaussen, H. (1953).** Saison sèche et indice xérothermique. *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de Toulouse*, 88(3-4), 193-239.

**Barkas, F., Bathrellou, E., Nomikos, T., Panagiotakos, D., Liberopoulos, E., & Kontogianni, M. D. (2023).** Plant sterols and plant stanols in cholesterol management and cardiovascular prevention. *Nutrients*, 15 (13), 2845.

**Barros, M. (2019).** Les huiles essentielles en pratique à l'officine et fiches-conseils. (Doctoral dissertation).

**Bashlouei, S. G., Karimi, E., Zareian, M., Oskoueian, E., & Shakeri, M. (2022).** Heracleum persicum essential oil nanoemulsion: A nanocarrier system for the delivery of promising anticancer and antioxidant bioactive agents. *Antioxidants*, 11(5), 831.

**Belhouala, K., & Benarba, B. (2021).** Medicinal plants used by traditional healers in Algeria: A multiregional ethnobotanical study. *Frontiers in Pharmacology*, 12, 760492.

**Bellakhdar, J. (1997).** La pharmacopée marocaine traditionnelle. Médecine arabe ancienne et savoirs populaires, Paris-Rabat. *Le Fennec*, 764, p1997.

**Benabdeli, K. (1992).** Le thuya : une essence noble en voie de disparition. *El. Ardh*, 21, 38-42.

**Benabid, A. (1976).** Etude écologique, phytosociologique et sylvo-pastorale de la *Tetraclinaia* de l'Amisttène. Thèse 3<sup>ème</sup> cycle. Univ. Aix Marseille III.155p.

**Bencheikh, S. E. (2017).** Etude de l'activité des huiles essentielles de la plante *Teucrium polium ssp Eurasianum Labiatae* (Doctoral dissertation).

**Ben Ghnaya, A., Amri, I., Hanana, M., Samia Gargouri, S., Bassem Jamoussi, B., Abderrahmane Romane, A., & Hamrouni, L. (2016).** *Tetraclinis articulata* (Vahl.) Masters essential oil from Tunisia: Chemical characterization and herbicidal and antifungal activities assessment. *Industrial Crops and Products*, 83, 113–117.

- Benjemaa, M., Snoussi, M., Falleh, H., Hessini, K., Msaada, K., Flamini, G., & Ksouri, R. (2022).** Chemical composition, antibacterial and antifungal activities of Four essential oils collected in the North-East of Tunisia. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 25(2), 338-355.
- Ben Jemia, M., Chaabane, S., Senatore, F., Bruno, M., & Kchouk, M. E. (2013).** Studies on the antioxidant activity of the essential oil and extract of Tunisian *Tetraclinis articulata* (Vahl) Mast. (Cupressaceae). *Natural product research*, 27(16), 1419-1430.
- Bensaadi, N., Maatoug, M., Maatoug, Z.Z., & Zemour, K. (2024).** Effect of stationary factors on the yield and chemical composition of essential oils of *Tetraclinis articulata* (Vahl) Masters from Sdama Chergui massif's (Tiaret, North West Algeria). *Journal of Agriculture and Applied Biology*, 5(2), 215-231.
- Benoutman, A., Erbiai, E. H., Ettakifi, H., Legssyer, M., Handaq, N., Makrane, H., Saidi, R., Lamrani, Z., Pintado, M., Pinto, E., Esteves da Silva, J.C.G., & Maouni, A. (2024).** Phytochemical analysis, antioxidant, antifungal activity, and genotoxicity of essential oil and solvent extracts of *Tetraclinis articulata* leaves from northern Morocco. *Letters in Applied NanoBioScience*, 13(1).
- Benzie, I. F., & Devaki, M. (2018).** The ferric reducing/antioxidant power (FRAP) assay for non-enzymatic antioxidant capacity: concepts, procedures, limitations and applications. *Measurement of antioxidant activity & capacity: Recent trends and applications*, 77-106.
- Bertelli, A., Biagi, M., Corsini, M., Baini, G., Cappellucci, G., & Miraldi, E. (2021).** Polyphenols: From Theory to Practice. *Foods*, 10(11), 2595
- Bhandary, B., Marahatta, A., Kim, H. R., & Chae, H. J. (2012).** An involvement of oxidative stress in endoplasmic reticulum stress and its associated diseases. *International journal of molecular sciences*, 14(1), 434-456.
- Bié, J., Sepodes, B., Fernandes, P. C., & Ribeiro, M. H. (2023).** Polyphenols in health and disease : gut microbiota, bioaccessibility, and bioavailability. *Compounds*, 3(1), 40-72.
- Blerot, P., et Mhirit, O. (1999).** Le grand livre de la forêt marocaine. Mardaga.
- Boudy, P. (1950).** Economie forestière Nord-Africaine. Monographie et traitement des essences. Ed. Larose. Paris. pp 29 - 249.
- Boufares, K., Hassani, A., & Alem, A.S. (2019).** Essential oil composition and antimicrobial activities of some *Cupressaceae* species from Algeria against two phytopathogenic microorganisms. *Journal of Crop Protection*, 8(2), 223-234.

- Boukhatem, M. N., Ferhat, A., & Kameli, A. (2019).** Méthodes d'extraction et de distillation des huiles essentielles : revue de littérature. *Une*, 3(4), 1653-1659.
- Boukhatem, M. N., Hamaidi, M. S., Saidi, F., & Hakim, Y. (2010).** Extraction, composition et propriétés physico-chimiques de l'huile essentielle du Géranium Rosat (*Pelargonium graveolens* L.) cultivé dans la plaine de Mitidja (Algérie). *Nature & Technologie*, 2(2), 37-45.
- Boukroufa, M. (2016).** *Extraction de Substances à Haute Valeur Ajoutée à Partir de Rejets de l'Industrie Agro-Alimentaire.* (Doctoral dissertation).
- Bounab, S. (2020).** *Biodiversité végétale de la région du Hodna (M'sila) : étude phytochimique et activité biologique de quelques espèces médicinales* (Doctoral dissertation)
- Bouras, M. (2018).** *Évaluation de l'activité antibactérienne des extraits de certaines plantes de l'est algérien sur des souches résistantes aux antibiotiques* (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba).
- Bourkhiss, M., Hnach, M., Bourkhiss, B., Ouhssine, B., Chaouch, A., & Satrani, B. (2009).** Effet de séchage sur la teneur et la composition chimique des huiles essentielles de *Tetraclinis articulata* (Vahl) Masters. 20 (1). 44-48.
- Bourkhiss, M., Hnach, M., Lakhlifi, T., Bouachrine, M., Farah, A., Satrani, B., Ouhssine, M., Chaouch, A., & Costa, J. (2012).** Fractionnement et valorisation de l'huile essentielle de la sciure de bois de *Tetraclinis articulata* (Vahl) Masters du Maroc. *Phytothérapie*, 10(4), 222-228.
- Bourkhiss, M., Hnach, M., Lakhlifi, T., Boughdad, A., Farah, A., & Satrani, B. (2011).** Effect of age and vegetative stage on essential oil content and chemical composition of *Thuya articulata*. *Les technologies de laboratoire*, 6(23), 64-68.
- Bourkhiss, M., Hnach, M., Lakhlifi, T., Bourkhiss, B., Ouhssine, M., & Satrani, B. (2010a).** Production et caractérisation de l'huile essentielle de la sciure de bois de *Tetraclinis articulata* (Vahl) masters. *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*. 79, 4-11.
- Bourkhiss, M. B., Hnach, M., Paolini, J., Costa, J., Farah, A., & Satrani, B. (2010b).** Propriétés antioxydantes et anti-inflammatoires des huiles essentielles des différentes parties de *Tetraclinis articulata* (Vahl) Masters du Maroc. *Bulletin de la Société royale des sciences de Liège*. 79, 141-154.
- Bourkhiss, M., Lachkar, M., Ouakil, A., Farah, A., & Bouachrine, M. (2023).** Composition chimique et bioactivité de l'huile essentielle des feuilles de thuya de Berberie (*Tetraclinis articulata* Vahl) et de ses fractions chromatographiques. *Phytothérapie*, 21(1), 29-34.
- Bourkhiss, M., Lakhlifi, T., Chaouch, A., & Ouhssine, M. (2016).** Intérêt de l'huile essentielle du thuya de Berberie. *Phytothérapie*, 14, 109-111.

**Boussaid, M. (2017).** *Caractérisation des huiles essentielles de *Tetraclinis articulata* (Vahl) Masters (Thuya de Barbarie) de la région de Tlemcen et étude de leurs activités biologiques* (Doctoral dissertation, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen).

**Boussaid, M., Bekhechi, C., Beddou, F., Sar, D. C., Bighelli, A., Casanova, J., & Tomi, F. (2015).** Chemical variability of the essential oil isolated from aerial parts of *Tetraclinis articulata* from North-Western Algeria. *Natural Product Communications*, 10(8), 1447-1452.

**Boussaid, M., Bekhechi, C., Tomi, P., & Tomi, F. (2022).** Annual variation in essential oil yield and composition from leaves of *Tetraclinis articulata* in Northwestern Algeria (Aïn Kebira, Tlemcen Province). *Journal of Natural Product Research and Applications*, 2(1), 30-37.

**Boutekedjiret, C. (1999).** *Étude des procédés d'extraction appliqués à la récupération des essences de romarin. Transfert de matière et modélisation.* Diss. Thèse de doctorat d'État, École nationale polytechnique, Alger, Algérie.

**Boveris, A., & Chance, B. (1973).** The mitochondrial generation of hydrogen peroxide. General properties and effect of hyperbaric oxygen. *Biochemical Journal*, 134(3), 707-716.

**Brosse, J. (2004).** Larousse des arbres: dictionnaire des arbres et des arbustes.

**Buhagiar J., Podesta M.T., Lioni P. L., Flamini G., & Morelli, I. (2000).** Essential oil composition of different parts of *Tetraclinis articulata*. *Journal of Essential Oil Research*, 12(1), 29-32.

## C

**Calderón-Montaña, J. M., Martínez-Sánchez, S. M., Jiménez-González, V., Burgos-Morón, E., Guil-lén-Mancina, E., Jiménez-Alonso, J. J., Díaz-Ortega, P., García, F., Aparicio, A., & López-Lázaro, M. (2021).** Screening for selective anticancer activity of 65 extracts of plants collected in Western Andalusia, Spain. *Plants*, 10(10), 2193.

**Carrillo López, A. F., Esteve Selma, M. A., Montoya Bernabéu, P., Moya Pérez, J. M., Miñano, J., Hernández García, I., Carrión García, J. S., Charco García, J., Fernández Jiménez, S., Munuera Giner, M., & Ochando Tomás, J. (2019).** *Tetraclinis Articulata* : biogéographie, écologie menaces et conservation.

**Cascaes, M. M., De Moraes, Â. A. B., Cruz, J. N., Franco, C. D. J. P., E Silva, R. C., Nascimento, L. D. D., Oliveira Ferreira, O., Oliveira dos Anjos, T., Santana de Oliveira,**

- M., Skelding Pinheiro Guilhon, G. M. & Andrade, E. H. D. A. (2022).** Phytochemical profile, antioxidant potential and toxicity evaluation of the essential oils from *Duguetia* and *Xylopia* species (Annonaceae) from the Brazilian Amazon. *Antioxidants*, 11(9), 1709.
- CFT (2022).** Conservation des forêts de la Wilaya de TIARET
- CFT. IFN, (2016-2020).** Conservation des forêts de la Wilaya de TIARET-Service de cartographie et Service des statistiques et Inventaire forestier National.
- Chavent, M., Girard, S., Kuentz-Simonet, V., Liquet, B., Nguyen, T. M. N., & Saracco, J. (2014).** A sliced inverse regression approach for data stream. *Computational Statistics*, 29, 1129-1152.
- Chefnaj, F. E., Boughdad, A., & Lakhiari, H. (2023).** Impact of essential oils of *Mentha spicata*, *M. pulegium*, *M. suaveolens* and *Artemisia herba Alba* on *Apis mellifera* mortality. *Teikyo Medical Journal*, 46(08).
- Chikhoun, A., Hazzit, M., Kerbouche, L., Baaliouamer, A., & Aissat, K. (2013).** *Tetraclinis articulata* (Vahl) Masters essential oils: Chemical composition and biological activities. *Journal of essential oil research*, 25(4), 300-307.
- Cnubben, N. H., Rietjens, I. M., Wortelboer, H., van Zanden, J., & van Bladeren, P. J. (2001).** The interplay of glutathione-related processes in antioxidant defense. *Environmental toxicology and pharmacology*, 10(4), 141-152.
- Collin, F. (2019).** Chemical basis of reactive oxygen species reactivity and involvement in neurodegenerative diseases. *International journal of molecular sciences*, 20(10), 2407.

## D

- da Costa, L. S., de Moraes, Â. A. B., Cruz, J. N., Mali, S. N., Almeida, L. Q., do Nascimento, L. D., Ferreira, O. O., Luiz Pompeu Varela, E., Percário, S. V., Santana de Oliveira, M. & Andrade, E. H. D. A. (2022).** First report on the chemical composition, antioxidant capacity, and preliminary toxicity to *Artemia salina* L. of *Croton campinarenis* Secco, A. Rosário & PE Berry (Euphorbiaceae) essential oil, and in silico study. *Antioxidants*, 11(12), 2410.
- Dajic Stevanovic, Z., Sieniawska, E., Glowniak, K., Obradovic, N., & Pajic-Lijakovic, I. (2020).** Natural macromolecules as carriers for essential oils: From extraction to biomedical application. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 563.

- Daud, N. M., Putra, N. R., Jamaludin, R., Norodin, N. S. M., Sarkawi, N. S., Hamzah, M. H. S., Nasir, H. M., Zaidel, D. N. A., Yunus, M. A. C., & Salleh, L. M. (2022).** Valorisation of plant seed as natural bioactive compounds by various extraction methods: A review. *Trends in Food Science & Technology*, *119*, 201-214.
- D'Autréaux, B., & Toledano, M. B. (2007).** ROS as signalling molecules: mechanisms that generate specificity in ROS homeostasis. *Nature reviews Molecular cell biology*, *8*(10), 813-824.
- Davalli, P., Marverti, G., Lauriola, A., & D'Arca, D. (2018).** Targeting oxidatively induced DNA damage response in cancer: opportunities for novel cancer therapies. *Oxidative medicine and cellular longevity*, *2018*(1), 2389523.
- Davies, K. J. (1986).** Intracellular proteolytic systems may function as secondary antioxidant defenses: an hypothesis. *Journal of free radicals in biology & medicine*, *2*(3), 155-173.
- Del Río, L. A., & López-Huertas, E. (2016).** ROS generation in peroxisomes and its role in cell signaling. *Plant and Cell Physiology*, *57*(7), 1364-1376.
- De Medeiros Gomes, J., Cahino Terto, M. V., Golzio do Santos, S., Sobral da Silva, M., & Fechine Tavares, J. (2021).** Seasonal Variations of Polyphenols Content, Sun Protection Factor and Antioxidant Activity of Two Lamiaceae Species. *Pharmaceutics*, *13*(1), 110.
- de Moraes, Â. A. B., Ferreira, O. O., da Costa, L. S., Almeida, L. Q., Varela, E. L. P., Cascaes, M. M., Pereira Franco, C. D. J., Percário, S., Diniz do Nascimento, L., Santana de Oliveira, M. & Andrade, E. H. D. A. (2022).** Phytochemical profile, preliminary toxicity, and antioxidant capacity of the essential oils of *Myrciaria floribunda* (H. West ex willd.) O. Berg. And *myrcia sylvatica* (G. Mey) DC.(Myrtaceae). *Antioxidants*, *11*(10), 2076.
- Deschepper, R. (2017).** *Variabilité de la composition des huiles essentielles et intérêt de la notion de chémotype en aromathérapie*. (Doctoral dissertation).
- de Sousa, D. P., Damasceno, R. O. S., Amorati, R., Elshabrawy, H. A., de Castro, R. D., Bezerra, D. P., Nunes, V. R. V., Gomes, R. C., & Lima, T. C. (2023).** Essential Oils : Chemistry and pharmacological activities. *Biomolecules*, *13*(7), 1144.
- Diomande, L. B., kanko, C., Tia, E. V., kone, B., & Yao-kouam, A. (2014).** Occurrence et composition chimique de l'huile essentielle des feuilles de *Lippia multiflora* M. (thé de savane) selon le pH, les teneurs en Carbone, en Azote et Phosphore du sol en zones de savane guinéenne en Côte d'Ivoire. *Afrique Science : Revue Internationale des Sciences et Technologie*, *10*(4), 93-108.

- Djeddi, S., Yannakopoulou, E., Papadopoulos, K., & Skaltsa, H. (2015).** Activités anti-radicalaires de l'huile essentielle et des extraits bruts de *Thymus numidicus* Poiret., Algérie. *Afrique Science : Revue Internationale Des Sciences Et Technologie*, 11(2), 58-65.
- Djouahri, A. (2013).** *Etude phytochimique du Tetraclinis articulata algérien et valorisation des activités biologiques des extraits* (Doctoral dissertation, Faculté de Chimie).
- Djouahri, A., Boualem, S., Boudarene, L., & Baaliouamer, A. (2015).** Geographic's variation impact on chemical composition, antioxidant and anti-inflammatory activities of essential oils from wood and leaves of *Tetraclinis articulata* (Vahl) Masters. *Industrial crops and Products*, 63, 138-146.
- Djouahri A, Boudarene L. (2012)** Antioxidant and anti-inflammatory activity of methanolic, chloroform and ethyl acetate extracts of leaves *Tetraclinis articulata* (Vahl) Masters Algerian. *International Journal of Research in Pharmacology and Phytochemistry*, 2(1), 7-11.
- Djouahri, A., Boudarene, L., & Meklati, B. Y. (2013).** Effect of extraction method on chemical composition, antioxidant and anti-inflammatory activities of essential oil from the leaves of Algerian *Tetraclinis articulata* (Vahl) Masters. *Industrial Crops and Products*, 44, 32-36.
- Dizajeyekan, Y. I., Ahmad Razban Haghghi, A. R., & Gajoti, T. E. (2016).** Regional altitude and soil physicochemical factors influence the essential oil of *Thymus pubescens* (Lamiales: Lami-aceae). *Journal of Biological & Environmental sciences*, 10(29), 45-51.
- Dridi, F. (2005).** *Extraction et analyse de l'huile essentielle de cumin formulation d'une pommade decongestionnante* (Doctoral dissertation).
- Dung, N. T., Kim, J. M., & Kang, S. C. (2008).** Chemical composition, antimicrobial and antioxidant activities of the essential oil and the ethanol extract of *Cleistocalyx operculatus* (Roxb.) Merr and Perry buds. *Food and chemical Toxicology*, 46(12), 3632-3639.

## E

- Eddabbeh, F. E., Mohamed, Abdoul-Latif, F., Ainane, A., Ejjabraoui, M., & Ainane, T. (2021).** The composition of the essential oil and the antimicrobial and antifungal activities of *Tetraclinis articulata* (Vahl) Masters from the Moroccan central plateau (Morocco). *Pharmacologyonline*, 2, 458-464.
- El Bouhtoury-Charrier, F. E., Hakam, A., Famiri, A., Ziani, M., & Charrier, B. (2009).** Wood characterization of *Tetraclinis articulata* and evaluation of its resistance against lignolytic fungi. *Doc No. IRG/WP*, 09-10697.

- El Hachlafi, N., Fikri-Benbrahim, K., Al-Mijalli, S. H., Elbouzidi, A., Jeddi, M., Abdallah, E. M., Assag-gaf, H., Bouyahya, A., Alnasser, S. M., Attar, A., Wen Goh, K., Chiau Ming, L., Ong, S. K., Mrabti, H. N., & Ouazzani Chahdi, F. (2023).** *Tetraclinis articulata* (Vahl) Mast. essential oil as a promising source of bioactive compounds with antimicrobial, antioxidant, anti-inflammatory and dermatoprotective properties: In vitro and in silico evidence. *Heliyon*, *10*, Article e23084.
- Elidrissi, A. E., Mssillou, I., Agour, A., Tourabi, M., Nouioura, G., Lyoussi, B., & Derwich, E. (2023).** Phytochemical Analysis and Evaluation of Antifungal and Antioxidant Activities of Essential Oil of Fruits from *Juniperus oxycedrus* L. Obtained from Morocco. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, *59*, e21088.
- El Jemli, M., Kamal, R., Marmouzi, I., Doukkali, Z., Boudida, E. H., Touati, D., Nejjari, R., El Guessabi, L., Cherrah, Y., & Alaoui, K. (2017).** Chemical composition, acute toxicity, antioxidant and anti-inflammatory activities of Moroccan *Tetraclinis articulata* L. *Journal of traditional and complementary medicine*, *7*(3), 281-287.
- El khasmi, M., & Farh, M. (2022).** Impact of medicinal plants on the kidney. *Revue Marocaine de Néphrologie*, *2*(5), 32-40.
- El Mouridi, M. (2011).** *Caractérisation mécanique de la loupe de thuya (Tetraclinis Articulata (Vahl) Masters) en vue de sa valorisation* (Doctoral dissertation, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc).
- Emberger, L. (1930).** *La végétation de la région méditerranéenne : essai d'une classification des groupements végétaux*. Librairie générale de l'enseignement.
- Emberger, L. (1955).** Une classification biogéographique des climats. Recueil, travaux de laboratoire géolo-zoologique, Faculté des sciences. Service botanique. Montpellier, *7*(3-43).
- Escofier, B. (1979).** Traitement simultané de variables qualitatives et quantitatives en analyse factorielle. *Les cahiers de l'analyse des données*, *4*(2), 137-146.
- Ezraty, B., Aussel, L., & Barras, F. (2005).** Methionine sulfoxide reductases in prokaryotes. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Proteins and Proteomics*, *1703*(2), 221-229.

## F

- Fadel, H., Benayache, F., Chalchat, J-C., Figueredo, G., Chalard, P., Hazmoune, H., & Benayache, S. (2019).** Essential oil constituents of *Juniperus oxycedrus* L. and *Cupressus sempervirens* L. (*Cupressaceae*) growing in Aures region of Algeria. *Natural Product Research*, *35*(15), 2616– 2620.

- Farjon, A. (2010).** *A Handbook of the World's Conifers: Revised and Updated Edition*. Vol I. Brill
- Farjon, A., & Filer, D. (2013).** *An atlas of the world's conifers: an analysis of their distribution, biogeography, diversity and conservation status*. Brill.
- Fernández-Sestelo, M., & Carrillo, J. M. (2020).** Environmental effects on yield and composition of essential oil in wild populations of spike Lavender (*Lavandula latifolia* Medik.). *Agriculture*, 10(12), 626.
- Fisher, A. B., Zhang, Q. Â. Â., Geoffrey, J. L., & Steven, D. S. (2006).** Nadph and nadph oxidase. *Encyclopedia of Respiratory Medicine*.
- Franchomme, P., Jollois, R., Péroël, D., Mars, J., & Mars, J. (1990).** *L'aromathérapie exactement: encyclopédie de l'utilisation thérapeutique des huiles essentielles: fondements, démonstration, illustration et applications d'une science médicale naturelle*. R. Jollois.
- Fusaro, I., Cavallini, D., Giammarco, M., Serio, A., Mammi, L. M., De Matos Vettori, J., Lanzoni, L., Formigoni, A. & Vignola, G. (2022).** Effect of diet and essential oils on the fatty acid composition, oxidative stability and microbiological profile of Marchigiana burgers. *Antioxidants*, 11(5), 827.

## G

- Gardes-Albert, M., Bonnefont-Rousselot, D., Abedinzadeh, Z., & Jore, D. (2003).** Espèces réactives de l'oxygène: Comment l'oxygène peut-il devenir toxique? Reactive oxygen species. How oxygen may become toxic. *L'Actualité chimique*, 11-12.
- Ghavam, M., Afzali, A., Manconi, M., Bacchetta, G., & Manca, M. L. (2021).** Variability in chemical composition and antimicrobial activity of essential oil of *Rosa × damascena* Herm. From mountainous regions of Iran. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 8(22).
- Giorgio, M., Trinei, M., Migliaccio, E., & Pelicci, P. G. (2007).** Hydrogen peroxide: a metabolic by-product or a common mediator of ageing signals?. *Nature reviews Molecular cell biology*, 8(9), 722-728.
- Gourari, B. (2005).** *Intégration des données multi-sources dans un Système d'Information Géographique (SIG) pour l'inventaire et l'aménagement forestier de la forêt des Sdamas Chergui -Tiaret-*. Mémoire Magister, Université de Mascara.
- Group, A.P. (2009).** An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG III. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 161(2), 105–121p

**Guerroudj, S., Maatoug, M., Naceur, K., Chaibi, R., Khene, M., & boualem, A. (2021).** Extraction, yield and chemical composition of essential oils of *Juniperus oxycedrus* L. from Tiaret region (Algeria). *Ukrainian Journal of Ecology*, 11(10), 105-111.

## H

**Haddad, A., Lachenal, D., Marechal, A., Kaid-Harche, M., & Janin, G. (2006).** Caractéristiques papetières de la pâte de bois de thuya de Berbérie (Algérie) (*Tetraclinis articulata* Vahl) obtenue par un procédé soude-anthraquinone. *Annals of forest science*, 63(5), 493-498.

**Hadjadj, S. (1995).** Les peuplements du Thuya de Berbérie en Algérie: phytoécologie, syntaxonomie, potentialités sylvicoles. (Doctoral dissertation, Thèse Doct. Es-Sci. Univ. Aix-Marseille. 159 p+ ann).

**Hadjadj Aoul, S., Chouieb, M., & Loisel, R. (2009).** Effet des facteurs environnementaux sur les premiers stades de la régénération naturelle de *Tetraclinis articulata* (Vahl, Master) en Oranie, Algérie. *Ecologia mediterranea*, 35(1), 19-30.

**Hadjadj-aoul, S. (1988).** Analyse phytoécologique du thuya de Berbérie en Oranie (Doctoral dissertation, Thèse Magistère, Univ. Oran, 150).

**Hadjadj, K., & Letreuch Belarouci, A. (2017).** Bibliographic synthesis about the Berbary thuya (*Tetraclinis articulata* (Vahl) Mast.). *Geo-Eco-Trop*, 41(1), 13-27.

**Hedjal-Chebheb, M. (2014).** *Identification des principes actifs des huiles essentielles de quelques résineux et plantes aromatiques de provenance Algérienne et Tunisienne. Etude de leurs activités biologiques à l'égard d'un insecte ravageur des graines stockées, Callosobruchus maculatus F. 1775 (Coleoptera: Bruchidae)* (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri De Tizi Ouzou. 103p).

**Hamdani, F. Z., Ziri, S., Benallou, A., Djani, H., & Belkacemi, A. (2021).** High antifungal capacity of the essential oils of *Thymus vulgaris* and *Tetraclinis articulata*. *Phytothérapie*, 19(3), 190- 194.

**Hawkins, C. L., & Davies, M. J. (2019).** Detection, identification, and quantification of oxidative protein modifications. *Journal of Biological Chemistry*, 294(51), 19683-19708.

**Herrera-Calderon, O., Chacaltana-Ramos, L. J., Huayanca-Gutiérrez, I. C., Algarni, M. A., Alqarni, M., & Batiha, G. E. S. (2021).** Chemical constituents, in vitro antioxidant activity and in silico study on NADPH oxidase of *Allium sativum* L.(garlic) essential oil. *Antioxidants*, 10(11), 1844.

**Herzi, N., Bouajila, J., Camy, S., Romdhane, M., & Condoret, J. S. (2013).** Comparison of different methods for extraction from *Tetraclinis articulata*: Yield, chemical composition and antioxidant activity. *Food Chemistry*, 141(4), 3537-3545.

**Hill, M. O., & Smith, A. J. E. (1976).** Principal component analysis of taxonomic data with multi-state discrete characters. *Taxon*, 25(2), 249-255.

**Hong, Y., Boiti, A., Vallone, D., & Foulkes, N. S. (2024).** Reactive oxygen species signaling and oxidative stress: transcriptional regulation and evolution. *Antioxidants*, 13(3), 312.

**Hou, C. Y., Hou, Z. T., Lin, C. M., Shih, M. K., Chen, Y. W., & Lai, Y. H. (2020).** Adding  $\alpha$ -pinene as a novel application for sulfur dioxide-free in red wine. *International Journal of Food Properties*, 23(1), 167-177.

### I

**Ibrahim, T. A., Atef, A. E., El-Hefnawy, H. M., Al-Taweel, A. M., & Perveen, S. (2017).** Chemical composition and antimicrobial activities of essential oils of some coniferous plants cultivated in Egypt. *Iranian Journal of Pharmaceutical Research*, 16(1), 328-337.

**Igri, M. A., Holeman, M., Ilidrissi, A., & Berrada, M. (1990).** Contribution to the chemical study of essential oils of branchwood and wood of *Tetraclinis articulata*. *Plantes Médicinales et Phytothérapie*, 24(1), 36-43.

**Ito, F., Sono, Y., & Ito, T. (2019).** Measurement and clinical significance of lipid peroxidation as a biomarker of oxidative stress: oxidative stress in diabetes, atherosclerosis, and chronic inflammation. *Antioxidants*, 8(3), 72.

### J

**Jacques B, and André R. (2010).** Biochimie métabolique Ed ellipses. Paris p: 257-265.

**Jlizi, S., Lahmar, A., Zardi-Bergaoui, A., Ascricchi R., Flamini, G., Harrath, A. H., Chekir-Ghedira, L., & Ben Jannet, H. (2021).** Chemical composition and cytotoxic activity of the fractionated trunk bark essential oil from *Tetraclinis articulata* (Vahl) Mast. growing in Tunisia. *Molecules*, 26(4), 1110.

**Jones, D. P. (2006).** Redefining oxidative stress. *Antioxidants & redox signaling*, 8(9-10), 1865-1879.

**Juan, C. A., Pérez de la Lastra, J. M., Plou, F. J., & Pérez-Lebeña, E. (2021).** The chemistry of reactive oxygen species (ROS) revisited: outlining their role in biological macromolecules (DNA, lipids and proteins) and induced pathologies. *International journal of molecular sciences*, 22(9), 4642.

**Jurčević Šangut, I., & Šamec, D. (2024).** Seasonal Variation of Polyphenols and Pigments in Ginkgo (*Ginkgo biloba* L.) leaves: Focus on 3',8"-Biflavones. *Plants*, 13(21), 3044.

K

**Kamal, F. Z., Stanciu, G. D., Lefter, R., Cotea, V. V., Niculaua, M., Ababei, D. C., Ciobica, A., & Ech-Chahad, A. (2022).** Chemical composition and antioxidant activity of Ammi visnaga L. essential oil. *Antioxidants*, 11(2), 347.

**Karakoti, H., Mahawer, S. K., Tewari, M., Kumar, R., Prakash, O., de Oliveira, M. S., & Rawat, D. S. (2022).** Phytochemical profile, in vitro bioactivity evaluation, in silico molecular docking and ADMET study of essential oils of three Vitex species grown in Tarai Region of Uttarakhand. *Antioxidants*, 11(10), 1911.

**Kaźmierczak-Barańska, J., Boguszewska, K., Adamus-Grabicka, A., & Karwowski, B. T. (2020).** Two faces of vitamin C—antioxidative and pro-oxidative agent. *Nutrients*, 12(5), 1501.

**Klotz, L. O., & Steinbrenner, H. (2017).** Cellular adaptation to xenobiotics: Interplay between xenosensors, reactive oxygen species and FOXO transcription factors. *Redox biology*, 13, 646-654.

**Khalil, N., El-Jalel, L., Yousif, M., & Gonaïd, M. (2020).** Altitude impact on the chemical profile and biological activities of *Satureja thymbra* L. essential oil. *BMC Complementary Medicine and Therapies*, 20(1), 186.

**Khatib, S., Mahdi, I., Drissi, B., Fahsi, N., Bouissane, L., & Sobeh, M. (2024).** *Tetraclinis articulata* (Vahl) Mast: Volatile constituents, antioxidant, antidiabetic and wound healing activities of its essential oil. *Heliyon*, 10(3), Article e24563.

**Kouadria (2019).** Application du SIG et télédétection pour la cartographie de la sensibilité aux feux de forêts de la forêt domaniale des Sdamas Chergui de la Wilaya de Tiaret. Université Ibn Khaldoun –Tiaret. P 24. 42.

**Koudou, P. J. (2009).** *Etude phytochimique, activités antimicrobiennes et antioxydantes de quelques plantes aromatiques et médicinales africaines.* (Doctoral dissertation).

**Kowaltowski, A. J., de Souza-Pinto, N. C., Castilho, R. F., & Vercesi, A. E. (2009).** Mitochondria and reactive oxygen species. *Free Radical Biology and Medicine*, 47(4), 333-343.

L

**Labdelli, A., Zemour, K., Simon, V., Cerny, M., Adda, A., & Merah, O. (2019).** *Pistacia Atlantica* Desf., a source of healthy vegetable oil. *Applied Sciences*, 9(12), 2552.

- Laftouhi, A., Eloutassi, N., Ech-Chihbi, E., Rais, Z., Abdellaoui, A., Taleb, A., Beniken, M., Nafidi, H. A., Salamatullah, A. M., Bourhia, M., & Mustapha Taleb, M. (2023).** The impact of environmental stress on the secondary metabolites and the chemical compositions of the essential oils from some medicinal plants used as food supplements. *Sustainability*, *15*(10), 7842.
- Laiche, C., & Mecheri, M. (2023).** *Extraction des huiles essentielles et hydrolats*. Mémoire Master, diplôme Startup.
- Lapie, G., & Maige, A. (1914).** Flore forestière illustrée comprenant les espèces ligneuses de l'Algérie et les espèces ligneuses les plus répandues en Tunisie, au Maroc et dans le Midi de la France. . Ed. ORLMAC. Paris 357 p.
- Lee, J. I., Choi, J. H., Kwon, T. W., Jo, H. S., Kim, D. G., Ko, S. G., Song, G. J., & Cho, I. H. (2023).** Neuroprotective effects of bornyl acetate on experimental autoimmune encephalomyelitis via anti-inflammatory effects and maintaining blood-brain-barrier integrity. *Phytomedicine*, *112*, 154569.
- Letreuch-Belarouci, N. (1991).** Les reboisements en Algérie et leur perspective d'avenir. Vol. I. Alger.
- Loft, S. T. E. F. F. E. N., & Poulsen, H. E. (2000).** Antioxidant intervention studies related to DNA damage, DNA repair and gene expression. *Free Radical Research*, *33*, S67-83.
- Loya, B., Kumar, R., Thongdok, N. J., & Kumar, A. (2023).** Effect of altitude, environment and soil parameters on morphological characteristics and yield of essential oil in *Elsholtzia communis*. *Environment and Ecology*, *41*(4B), 2756-2765.
- Luca, S. V., Zengin, G., Sinan, K. I., Korona-Glowniak, I., Minceva, M., Skalicka-Woźniak, K., & Trifan, A. (2023).** Value-added compounds with antimicrobial, antioxidant, and enzyme-inhibitory effects from post-distillation and post-supercritical CO<sub>2</sub> extraction by-products of rosemary. *Antioxidants*, *12*(2), 244.

## M

- Ma, Q. (2010).** Transcriptional responses to oxidative stress: pathological and toxicological implications. *Pharmacology & therapeutics*, *125*(3), 376-393.
- Maatoug, M., Keller, R., Benabdeli, K., & Dilem, A. (2004).** Études microdensitométriques du bois de thuya de Maghreb *Tetraclinis articulata* Vahl Masters et effets des facteurs stationnels sur sa qualité. *Sciences & Technologie. C, Biotechnologies*, 19-28.

- Magara, G., Prearo, M., Vercelli, C., Barbero, R., Micera, M., Botto, A., Caimi, C., Caldaroni, B., Berteza, C. M., Mannino, G., Barceló, D., Renzi, M., Gasco, L., Re, G., Dondo, A., Concetta Elia, A., & Pastorino, P. (2022).** Modulation of antioxidant defense in farmed rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed with a diet supplemented by the waste derived from the supercritical fluid extraction of basil (*Ocimum basilicum*). *Antioxidants*, *11*(2), 415.
- Magnani, F., & Mattevi, A. (2019).** Structure and mechanisms of ROS generation by NADPH oxidases. *Current opinion in structural biology*, *59*, 91-97.
- Maire, R. (1952).** Flore de l'Afrique du Nord (Maroc, Algérie, Tripolitaine, Cyrénaïque et Sahara). *Tome XXXIII, 1*.
- Manzur, M., Luciardi, M. C., Blázquez, M. A., Alberto, M. R., Cartagena, E., & Arena, M. E. (2023).** Citrus sinensis essential oils an innovative antioxidant and antipathogenic dual strategy in food preservation against spoilage bacteria. *Antioxidants*, *12*(2), 246.
- Marcos-Gómez, R., Vera-Guzmán, A. M., Pérez-Ochoa, M. L., Martínez-Martínez, L., Hernández-Delgado, S., Martínez-Sánchez, D., & Chávez-Servia, J. L. (2024).** Phenolic Compounds and Antioxidant Activity in Edible Flower Species from Oaxaca. *Applied Sciences*, *14*(8), 3136.
- Meddour, R., Sahar, O., & Jury, S. (2023).** New analysis of the endemic vascular plants of Algeria, their diversity, distribution pattern and conservation status. *Willdenowia*, *53*(1-2), 25-43.
- Merouane, A., Noui, A., Ali, K. N. B., & Saadi, A. (2014).** Activité antioxydante des composés phénoliques d'huile d'olive extraite par méthode traditionnelle. *International journal of biological and chemical sciences*, *8*(4), 1865-1870.
- Miladi, H., Ben Slama, R., Mili, D., Zouari, S., Bakhrouf, A., & Ammar, E. (2013).** Chemical composition and cytotoxic and antioxidant activities of *Satureja montana* L. essential oil and its antibacterial potential against *Salmonella* spp. strains. *Journal of Chemistry*, *2013*(1), 275698.
- Milenković, L., Ilić, Z. S., Šunić, L., Tmušić, N., Stanojević, L., Stanojević, J., & Cvetković, D. (2021).** Modification of light intensity influence essential oils content, composition and antioxidant activity of thyme, marjoram and oregano. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *28*(11), 6532-6543.

**Minchán-Herrera, P., Ybañez-Julca, R. O., Quispe-Díaz, I. M., Venegas-Casanova, E. A., Jara-Aguilar, R., Salas, F., Zevallos-Escobar, L., Yáñez, O., Pino-Rios, R., Buc Calderon, P. & Benites, J. (2022).** Valeriana pilosa roots essential oil: Chemical composition, antioxidant activities, and molecular docking studies on enzymes involved in redox biological processes. *Antioxidants*, 11(7), 1337.

**Mohammed, H. A., Qureshi, K. A., Ali, H. M., Al-Omar, M. S., Khan, O., & Mohammed, S. A. (2022).** Bio-evaluation of the wound healing activity of *Artemisia judaica* L. as part of the plant's use in traditional medicine; phytochemical, antioxidant, anti-inflammatory, and antibiofilm properties of the plant's essential oils. *Antioxidants*, 11(2), 332.

**Moon, J. K., & Shibamoto, T. (2009).** Antioxidant assays for plant and food components. *Journal of agricultural and food chemistry*, 57(5), 1655-1666.

**Mot, M. D., Gavrilaş, S., Lupitu, A. I., Moisa, C., Chambre, D., Tit, D. M., Bogdan, M. A., Bodescu, A. M., Copolovici, L., Copolovici, D. M. & Bungau, S. G. (2022).** *Salvia officinalis* L. essential oil: Characterization, antioxidant properties, and the effects of aromatherapy in adult patients. *Antioxidants*, 11(5), 808.

**Moussaoui, B., Hanafi, T., Rahali, A., Guemou, L., Reghioui, B., Zemour, K., & Riazi, A. (2024).** In vitro anti-inflammatory and anticoagulant activities of alkaloids extracted from nopals of inermis Algerian *Opuntia ficus indica* (L). *Journal of Agriculture and Applied Biology*, 5(1), 86-96.

## N

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

**Neffar, F., & Benabdrrahmene, Z. (2013).** Quantification des huiles essentielles dans deux espèces de Romarin (*Rosmarinus officinalis* et *Rosmarinus tournefortii*) au niveau de Djebel Metlili (Batna). *Revue Agriculture*, 05, 19-23.

**Nogala-Kalucka, M., Rudzinska, M., Zadernowski, R., Siger, A., & Krzyzostaniak, I. (2010).** Phytochemical content and antioxidant properties of seeds of unconventional oil plants. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 87, 1481-1487.

**Nourachani, I. (2010).** *Caractérisation physico-chimique et biologique de l'huile essentielle des écorces de cryptocayacrassifolia (Lauraceae)*. (Doctoral dissertation, thèse de l'obtention du diplôme d'étude approfondie (DEA)).

**Nowak, D. (2021).** Vitamin C in human health and disease. *Nutrients*, 13(5), 1595.

O

- Okado-Matsumoto, A., & Fridovich, I. (2001).** Subcellular distribution of superoxide dismutases (SOD) in rat liver: Cu, Zn-SOD in mitochondria. *Journal of Biological Chemistry*, 276(42), 38388-38393.
- Ouarghidi, A., & Abbad, A. (2019).** Ethnobotanical, ethnotaxonomic and ethnoecological study of *Anacyclus pyrethrum* var. *pyrethrum* (L.) Link. (Asteraceae) in Ait Mhamed valley (Region of Azilal, Morocco). *Revue d'ethnoécologie*, (16).
- Ouis, N. (2015).** *Etude chimique et biologique des huiles essentielles de coriandre, de fenouil et de persil*. Diss. Thèse de doctorat, Université Ahmed Ben Bella-Oran, Alger.

P

- Padayatty, S. J., Katz, A., Wang, Y., Eck, P., Kwon, O., Lee, J. H., Chen, S., Corpe, C., Dutta, A., K Dutta, S. & Levine, M. (2003).** Vitamin C as an antioxidant: evaluation of its role in disease prevention. *Journal of the American college of Nutrition*, 22(1), 18-35.
- Pages, J. (2004).** Analyse factorielle de données mixtes. *Revue de Statistiques Appliquées*, 52(4), 93-111.
- Pastori, G. M., Kiddle, G., Antoniw, J., Bernard, S., Veljovic-Jovanovic, S., Verrier, P. J., Graham Noctor, G. & Foyer, C. H. (2003).** Leaf vitamin C contents modulate plant defense transcripts and regulate genes that control development through hormone signaling. *The Plant Cell*, 15(4), 939-951.
- Poirot, T. (2016).** Bon usage des huiles essentielles, effets indésirables et toxicologie. *Mémoire de thèse, UNIVERSITE DE LORRAINE, Faculté de pharmacie, 97*.
- Putchala, M. C., Ramani, P., Sherlin, H. J., Premkumar, P., & Natesan, A. (2013).** Ascorbic acid and its pro-oxidant activity as a therapy for tumours of oral cavity—A systematic review. *Archives of oral biology*, 58(6), 563-574.

Q

- Quezel, P., Santa S. (1962- 1963).** Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales. Paris.1170 p.
- Quezel P., Medail F., 2003.** Écologie et biogéographie des forêts méditerranéennes. *Environmental Séries*, Elsevier. 571.
- Quézel, P. (2000).** *Réflexions sur l'évolution de la flore et de la végétation au Maghreb méditerranéen* (Vol. 1, pp. 1-10). Paris: Ibis press.

R

- Rabib, H., Zougagh, S., Hssain, M., Wadi Badri, W., & Koussa, T. (2019).** GC/MS analysis and anti- bacterial activity of the essential oil of Moroccan *Tetraclinis articulata* (Vahl) Masters. *Medi- terranean Journal of Chemistry*, 8(4), 302-307.
- Rabib, H., Elagdi, C., Hsaine, M., Fougrach, H., Koussa, T., & Wadi Badri, W. (2020).** Antioxidant and antibacterial activities of the essential oil of Moroccan *Tetraclinis articulata* (Vahl) Mas- ters. *Biochemistry Research International*, 2020(1), 9638548.
- Ray, P. D., Huang, B. W., & Tsuji, Y. (2012).** Reactive oxygen species (ROS) homeostasis and redox regulation in cellular signaling. *Cellular signalling*, 24(5), 981-990.
- 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(11), 1603-1616.
- Rhattas, M., Douira, A., & Zidane, L. (2016).** Étude ethnobotanique des plantes médicinales dans le Parc National de Talassemrane (Rif occidental du Maroc). *Journal of Applied Biosciences*, 97, 9187-9211.
- Richard, H. (1992).** Epices et aromates. TEC & DOC. Lavoisier. Paris, 339p.
- Roberts, C. K., & Sindhu, K. K. (2009).** Oxidative stress and metabolic syndrome. *Life sciences*, 84(21-22), 705-712.
- Rozas, V., Garcia-Cervigon, A. I., Garcia-Hidalgo, M., Rodriguez-Garcia, E., & Olano, J. M. (2021).** Living on the edge: Legacy of water availability on *Tetraclinis articulata* secondary growth under semiarid conditions in Morocco. *Dendrochronologia*, 68, 125853.

S

- Saada, M., Khemakhem, M., & Ksouri, R. (2021).** Variability of phenolic compound contents and biological activities in six medicinal species. *Journal of new sciences, Agriculture and Biotechnology*, 82 (5), 4791-4800.
- Saber, M., Harhar, H., Bouyahya, A., Ouchbani, T., & Tabyaoui, M. (2021a).** Chemical composition and antioxidant activity of essential oil of sawdust from Moroccan Thuya (*Tetraclinis articu- lata* (Vahl) Masters. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 11(1), 7912 - 7920.

- Saber, M., Harhar, H., El Hattabi, L., Zengin, G., Bouyahya, A., & Tabyaoui, M. (2021b).** Chemical composition and antioxidant activities of essential oils and extracts from cones of *Tetraclinis articulata* (Vahl) Masters. *International Journal of Secondary Metabolite*, 8(4), 352- 363.
- Sadiki, F. Z., Bouymajane, A., Sbiti, M., Chennaoui, S., Micalizzi, G., & Cacciola, F. (2022).** Chemical profile, antibacterial, antioxidant and insecticidal properties of the essential oil from *Tetraclinis articulata* (Vahl) Masters Cones. *Journal of Essential Oil Research*, 34(5), 383-393.
- Salhi, S., Fadli, M., Zidane, L., & Douira, A. (2010).** Etudes floristique et ethnobotanique des plantes médicinales de la ville de Kénitra (Maroc). *Mediterranean Botany*, 31, 133.
- Salmerón-Manzano, E., Garrido-Cardenas, J. A., & Manzano-Agugliaro, F. (2020).** Worldwide re- search trends on medicinal plants. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(10), 3376.
- Schieber, M., & Chandel, N. S. (2014).** ROS function in redox signaling and oxidative stress. *Current biology*, 24(10), R453-R462.
- Shah, M., Bibi, S., Kamal, Z., Al-Sabahi, J. N., Alam, T., Ullah, O., Murad, W., Ur Rehman, N. & Al-Harrasi, A. (2022).** Bridging the chemical profile and biomedical effects of *Scutellaria edelbergii* essential oils. *Antioxidants*, 11(9), 1723.
- Shakeri, M., Oskoueian, E., Le, H. H., & Shakeri, M. (2020).** Strategies to combat heat stress in broiler chickens: Unveiling the roles of selenium, vitamin E and vitamin C. *Veterinary sciences*, 7(2), 71.
- Sharma, V., Gautam, D. N. S., Radu, A. F., Behl, T., Bungau, S. G., & Vesa, C. M. (2022).** Reviewing the traditional/modern uses, phytochemistry, essential oils/extracts and pharmacology of *Embelia ribes burm*, *Antioxidants* 11, 1359–1383.
- Senouci, F., Ababou, A., Senouci, S., & Bouzada, N. (2023).** Traditional medicinal plants applied for the treatment of gastrointestinal diseases in Chlef, Algeria. *Egyptian Journal of Botany*, 63(2), 419-429.
- Sliti, S., Ayadi, S., Dumarcay, S., Khouja, M., Gerardin, P., André, E., Perrin, D., & Abderrabba, M. (2016).** Evaluation of essential oil composition and antioxidant capacity of hydromethanolic extracts of *Tetraclinis Articulata*, depending on location and seasonal variations. *Journal of Materials and Environmental Science*, 7(3), 968-980.
- Souilah, N., Bendif, H., Miara, M. D., & Frahtia, A. (2018).** Medicinal plants in floristic regions of El Harrouch and Azzaba (Skikda- Algeria): Production and therapeutic effects. *Journal of Flori- culture and Landscaping*, 4(1), 05-11.

**Stewart, P. (1969).** Quotient pluviothermique et dégradation biosphérique. *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle Afrique du Nord*, 59(1-4), 23-36.

T

**Tan, B. L., Norhaizan, M. E., & Liew, W. P. P. (2018).** Nutrients and oxidative stress: friend or foe? *Oxidative medicine and cellular longevity*, 2018(1), 9719584.

**Tassin, C. (2012).** *Paysages végétaux du domaine méditerranéen : Bassin méditerranéen, Californie, Chili central, Afrique du Sud, Australie méridionale*. IRD éditions.

**Tepe, B., Sokmen, M., Akpulat, H. A., Daferera, D., Polissiou, M., & Sokmen, A. (2005).** Antioxidative activity of the essential oils of *Thymus sipyleus* subsp. *sipyleus* var. *sipyleus* and *Thymus sipyleus* subsp. *sipyleus* var. *rosulans*. *Journal of Food Engineering*, 66(4), 447-454.

**Terras, M., Labani, A., Benabdeli, K., & Adda-Hanifi, N. (2008).** Dynamique phytoécologique du Thuya de Berbérie face à l'incendie. *Forêt méditerranéenne*, 29(1), 33-40.

**Toure, D. (2015).** *Etudes chimique et biologique des huiles essentielles de quatre plantes aromatiques médicinales de côte d'ivoire* (Doctoral dissertation, Université Felix Houphouët Boigny, Côte d'Ivoire).

V

**Vahl, M. (1791).** *Symbolae botanicae 2: 79. N. Möller et filius, Copenhagen*.

**Valko, M., Rhodes, C. J. B., Moncol, J., Izakovic, M. M., & Mazur, M. (2006).** Free radicals, metals and antioxidants in oxidative stress-induced cancer. *Chemico-biological interactions*, 160(1), 1-40.

**Vives-Bauza, C., Starkov, A., & Garcia-Arumi, E. (2007).** Measurements of the antioxidant enzyme activities of superoxide dismutase, catalase, and glutathione peroxidase. *Methods in cell biology*, 80, 379-393.

W

**Walas, Ł., & Taib, A. (2022).** Environmental regionalization and endemic plant distribution in the Maghreb. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(2), 100.

**Wei, J., Yang, Y., Peng, Y., Wang, S., Zhang, J., Liu, X., Liu, J., Wen, B., & Li, M. (2023).** Biosynthesis and the transcriptional regulation of terpenoids in tea plants (*Camellia sinensis*). *International Journal of Molecular Sciences*, 24(8), 6937.

**Wen, J. J., & Garg, N. J. (2018).** Manganese superoxide dismutase deficiency exacerbates the mitochondrial ROS production and oxidative damage in Chagas disease. *PLoS neglected tropical diseases*, 12(7), e0006687.

**White, F. (1986).** *La végétation de l'Afrique : mémoire accompagnant la carte de végétation de l'Afrique Unesco/AETFAT/UNSO* (Vol. 20). IRD Editions.

**Y**

**Yan, L. L., & Zaher, H. S. (2019).** How do cells cope with RNA damage and its consequences?. *Journal of Biological Chemistry*, 294(41), 15158-15171.

**Yang, H., Zhao, R., Chen, H., Jia, P., Bao, L., & Tang, H. (2014).** Bornyl acetate has an anti-inflammatory effect in human chondrocytes via induction of IL-11. *International Union of Biochemistry and Molecular Biology Life*, 66(12), 854-859.

**Z**

**Zahir, I., Elazaoui, S., Chakouri, M., & Naouer, B. (2020).** Étude ethnobotanique de *Tetraclinis articulata* dans la région de Béni Mellal-Khénifra. *Ethnobotany Research and Applications*, 19, 1-22.

**Zaibet, W. (2018).** *Composition chimique et activité biologique des huiles essentielles de *Daucus aureus* (Desf) et de *Reutera lutea* (Desf.) Maire, et leur application comme agents antimicrobiens dans le polyéthylène basse densité (PEBD)*. (Doctoral dissertation).

**Zamora, R., Vodovotz, Y., & Billiar, T. R. (2000).** Inducible nitric oxide synthase and inflammatory diseases. *Molecular medicine*, 6, 347-373.

**Zatout, A., Djibaoui, R., Flamini, G., Ascrizzi, R., Benbrahim, C., Mazari, H. E., Benkredda, F., Mechaala, S., & Kassah-Laouar, A. (2022).** Chemical composition analysis of essential oils of four plants from Aurès region of Algeria and their antibacterial and antibiofilm activities against coagulase-negative staphylococci. *African Journal of Clinical and Experimental Microbiology*, 23(3), 278-289.

**Zemour, K., Chouhim, K. M. A., Labdelli, A., Mairif, M., Ardjane, T. E. A., Moussaoui, B., Zemour, H., & Laafer, M. (2024).** Improvement of the antioxidant potential: impact of drying and extraction techniques on polyphenols in *Arbutus unedo* L. leaf aqueous extract. *Journal of Agriculture and Applied Biology*, 5(1), 35-47.

- Zerkani, H., Tagnaout, I., Dirioiche, A., Adadi, I., El Karkouri, J., Aaziz, H., Padzys, G. S., & Zair, T. (2019).** Chemical characterization and antibacterial activity of the essential oils of *Tetraclinis articulata* (Vahl) from Morocco. *Mediterranean Journal of Chemistry*, 8(5), 390-396.
- Zhang, J., Wang, X., Vikash, V., Ye, Q., Wu, D., Liu, Y., & Dong, W. (2016).** ROS and ROS-mediated cellular signaling. *Oxidative medicine and cellular longevity*, 2016(1), 4350965.
- Zhang, S., Zhang, L., Zou, H., Qiu, L., Zheng, Y., Yang, D., & Wang, Y. (2021).** Effect of light on secondary metabolite biosynthesis in medicinal plants. *Frontiers in Plant Science*, 12, 781236.
- Żukowska, G., & Durczyńska, Z. (2024).** Properties and applications of essential oils: A review. *Journal of Ecological Engineering*, 25(2).