

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE SCIENCES
DEPARTEMENT DES SCIENCES
DE LA NATURE ET DE LA VIE
N° :.....



DOMAINE : SNV
FILIERE : SCIENCES BIOLOGIQUE
OPTION : BIODIVERSITE ET
PHYSIOLOGIE VEGETALE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par : RIGHI Hadjer et
BOUKHALAT Nezhath Ezzaman

Intitulé

Phytochimie et activité antioxydante du genre
***Thymus* (synthèse théorique)**

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. Tahar SMAILI	MCA	Université de M'sila	Président
Dr. Hamdi BENDIF	MCA	Université de M'sila	Encadreur
Mr. Abdenassar HARRAR	MAA	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire 2020/2021

Remerciements

En premier lieu, Nous remercions **ALLAH** le tout puissant pour toute la volonté et le courage qu'il m'a donné pour l'achèvement de cette thèse.

Nous remercions **Dr. BENDIF Hamdi**, Maitre de conférences a l'université de Msila, qui a accepté de diriger ce mémoire, sa rigueur et ses qualités scientifiques.

Dr. SMAILI Tahar, Maître de Conférences à l'université de Msila, toutes nos reconnaissances en acceptant la présidence de jury de mémoire. **Mr. Abdenassar HARRAR**, Maitre-Assistant à 'université de Msila, veuillez accepter, nos sincères remerciements, en acceptant l'examinassions de notre travail, c'est un honneur et un immense plaisir que de présenter ce travail devant vous.

En fin, à tous ceux et celles qui ont contribué de près et de loin à la réalisation de ce Mémoire qu'ils trouvent ici l'expression de nos profondes gratitude et nos remerciements.

Dédicaces

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail a ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais Jamais à leur exprimer mon amour sincère.

A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite

Et tout mon respect : mon cher père **Boukhalat Said**.

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre Heureuse

Mon adorable mère **Bendjafer Hayat**.

A mes chères sœurs Marwa et **Mayssa** qui n'ont pas

Cessée de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes Études. Que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.

A mon adorable petit frère **Baha Eddine** qui sait toujours comment Procurer la joie et le bonheur pour toute la famille.

A monsieur **Dr.Bendif. H** pour tous les sacrifices et ses conseils

Merci pour leurs amours et leurs encouragements.

Sans oublier mon binôme **Righi Hadjer** pour son soutien moral, sa patience

Et sa compréhension tout au long de ce projet

Nezhat Ezzaman

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mes parents

Ma mère qui a tous sacrifié pour moi et mon frère et ma sœur, Qui m'a comblé de son amour,

Qui m'a appris que les bonnes choses dans la vie n'arrivent pas facilement

Qui m'a toujours soutenu et conseiller,

Pour toute son assistance et sa présence dans ma vie

Reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mon éternelle gratitude

Mon père, ce bel homme qui a toujours été, et restera toujours mon exemple et mon idole,

À mon super-héros qui a sacrifié tous ce qu'il pouvait pour nous voir heureux

Je te remercie pour les valeurs nobles et pour ton éducation.

Plus particulièrement à monsieur **Dr. Bendif H** et madame **Ben miri**, Mes encadrants qui m'ont été d'un grand soutien durant l'élaboration de mon mémoire de fin de formation

A la source de vie, d'affection source de joie et de bonheur source d'espoir et de motivation

A Boukhalat **Nezhat Ezzaman**, ma chère amie avant d'être binôme

Hadjer

Résumé

Thymus est une plante médicinale couramment utilisée en médecine traditionnelle pour traiter plusieurs maladies telles que le l'hypertension, le diabète, comme vermifuge et stomachique, nous avons mis en évidence les précédentes enquêtes sur *Thymus* y compris sa description botanique, sa répartition géographique, la chimie de ses métabolites secondaires, et surtout les huiles essentielles et les propriétés pharmacologiques (activité antioxydante). Les données sur *Thymus* ont été recueillies à l'aide de moteurs de recherche scientifiques tels que Science Direct, PubMed, Springer Link, Web of Science, Scopus Wiley Online et Google Scholar. Dans cette synthèse, les études mentionnent *Thymus*, sa description et ses activités phytopharmacologiques ont été cités. Les huiles et extraits de *Thymus* a présenté de nombreuses activités pharmacologiques telles qu'antioxydant, la caractérisation chimique des huiles par GC-MS a révélé la présence de nombreux composés chimiques (terpénoides). Notre analyse des rapports précédents a confirmé la preuve scientifique des utilisations ethnométricales de *Thymus*, en particulier l'activité antioxydante.

Mots clés : *Thymus* ; plantes médicinales ; pharmacologie ; phytochimie, huiles essentielles.

Abstract

Thymus is a medicinal plant commonly used in traditional medicine to treat several diseases such as hypertension, diabetes, as an anthelmintic and stomachic, we have highlighted the previous investigations on *Thymus* including its botanical description, its geographical distribution, the chemistry of its secondary metabolites, and especially essential oils and pharmacological properties (antioxidant activity). Data on *Thymus* was collected using scientific search engines such as Science Direct, PubMed, Springer Link, Web of Science, Scopus Wiley Online, and Google Scholar. In this synthesis, the studies mention *Thymus*, its description and its phytopharmacological activities have been cited. *Thymus* oils and extracts exhibited many pharmacological activities such as antioxidant, chemical characterization of oils by GC-MS revealed the presence of many chemical compounds (terpenoids). Our analysis of previous reports confirmed the scientific evidence for the ethnomedicinal uses of *Thymus*, in particular the antioxidant activity.

Keywords: *Thymus*; medicinal plants ; pharmacology; phytochemistry, essential oils.

ملخص

Thymus هو نبات طبي شائع الاستخدام في الطب التقليدي لعلاج العديد من الأمراض مثل ارتفاع ضغط الدم والسكري وطاراد للديدان و معالج للمعدة ، سلطنا الضوء على التحقيقات السابقة حول هذا النبات بما في ذلك وصفه النباتي وتوزيعه الجغرافي وكيمياء نواتجه الثانوية ، وخاصة الزيوت الأساسية والخصائص البيولوجية (نشاط مضاد للأكسدة). تم جمع البيانات عن النبات باستخدام محركات البحث العلمية مثل Science Direct و PubMed و Springer و Web of Science و Scopus Wiley Online و Google Scholar. في هذا التوليف، ذكرت الدراسات الخاصة بهذا النبات ، وقد تم الاستشهاد بوصفها وأنشطتها الدوائية النباتية. أظهرت زيوت ومستخلصاته العديد من الأنشطة الدوائية مثل مضادات الأكسدة ، وكشف التوصيف الكيميائي للزيوت بواسطة GC-MS عن وجود العديد من المركبات الكيميائية (التربينويدات). أكد تحليلنا للتقارير السابقة الأدلة العلمية على الاستخدامات الطبية لأنواع هذا الجنس ، ولا سيما النشاط المضاد للأكسدة.

الكلمات الرئيسية: *Thymus*؛ نباتات طبية ؛ علم العقاقير؛ الكيمياء النباتية والزيوت الأساسية.

Table de matière

Remerciement	
Résumé	
Table de matière	
Liste d'abréviation	
Liste des figures et Tableaux	
Introduction	1
CHAPITRE I : Le genre : <i>Thymus</i>	
I.1. Généralitéssur les plantes médicinales	3
2. Présentation de la famille des Lamiaceae	4
3. Intérêt économique, pharmacologique et nutritionnel des Lamiaceae	5
4. Le genre <i>Thymus</i>	5
5. Classification botanique	5
6. Description botanique	5
7. Répartition géographique de <i>Thymus</i>	6
CHAPITRE II : Métabolites secondaires	
1.1. Généralités	10
1.2. Classification des métabolites	10
I.2.1. Métabolites primaires	10
I.2.2. Métabolites secondaires	10
I.3. Classification de métabolite secondaire	11
I.3.1. Les composés Phénoliques	12
I.3.2. Les Alcaloïdes	13
I.3.3.Les Terpènes	13
Constituants d'huile essentielle	14
II. 4.Méthodes d'extraction des métabolites secondaires	15
II.5. Les principaux métabolites isolés du genre <i>Thymus</i>	16
CHAPITRE III : Activités antioxydante du genre <i>Thymus</i>	
2.1 Rappel sur l'activité anti-oxydante	25
1.Stress oxydatif	25
2.Antioxydants	25
Méthodes d'évaluation de l'activité antioxydante	26
Conclusion	34
Références Bibliographiques	35

Liste des figures

- Figure 01** : Carte de répartition géographique mondiale de la famille des Lamiaceae (en rouge)
- Figure 02** : Distribution géographique du thym dans le monde
- Figure 03** : Réaction entre DPPH • et antioxydant pour former DPPH
- Figure 04** : Formation d'un radical ABTS stable à partir d'ABTS avec du persulfate de potassium
- Figure 05** : Formation du complexe (Fe²⁺ + TPTZ) à partir du complexe (Fe³⁺ + TPTZ) par des antioxydants
- Figure 06** : Formation de Cu (Nc) + à partir de Cu (Nc) 2 2+ par antioxydant
- Figure 07** : Formation du complexe Fe³⁺ + xylénol orange à partir de Fe²⁺ + avec un oxydant suivi d'un traitement à l'orange xylénol

Liste des tableaux

- Tableau I** : Classification botanique de thym.
- Tableau II** : Localisation des principales espèces de thym en Algérie.
- Tableau III** : Exigences climatiques et de plantation du genre *Thymus*.
- Tableau IV** : Propriétés du thymol et du carvacrol.
- Tableau V** : Composition chimique de l'huile essentielle de différentes espèces de Thym.

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

Thymus, appartient à la famille des Lamiacées, Compte 215 espèces (**Cronquist, 1988**). *Thymus* est un Sous-arbrisseau vivace, assez robuste et touffue avec des racines noueuses et tortueuses, herbacées au sommet très diffuses, petit à moyen mesurant de 10 à 40 cm de haut et très odorant (**Thierry, 2005**), érigée ou prostré (**Quezel et Santa, 1962**).

Les feuilles sont très petites, sessiles, ovales, allant du vert (à l'ombre) au gris blanchâtre (en pleine soleil), linéaire ou linéaire-lancéolées, duveteuses au revers, lisses à l'avert et enroulées sur les bords (**Grunwald et Christof, 2004**). Cette plante est utilisée en médecine traditionnelle contre plusieurs maladies notamment contre la toux, elle est connue pour ces propriétés : dépurative, antigrippale. Ce thym est aussi pour traiter les angines, le rhume, le météorisme abdominal et les maladies des glandes endocrines (**Miaraet al., 2013**).

Des études pharmacologiques ont indiqué l'activité potentielle des extraits et des huiles essentielles de *Thymus* en tant qu'agents antioxydants (**Hazzitetal., 2006 ; Benchabane et al., 2012 ; Tefianiet al., 2015**).

Bien que de nombreuses études aient confirmé les effets pharmacologiques des extraits de *thymus* et de leurs composés contre une pléthore de troubles, aucune synthèse n'a été faite pour résumer de manière critique ces résultats et suggérer les futures applications potentielles de cette plante.

Dans le présent mémoire, nous avons résumé la description botanique, la taxonomie, la répartition géographique, les composants phytochimiques et l'activité antioxydante du genre *Thymus*.

Chapitre I :

Le genre :le genre *THYMUS*

I.1. Généralités sur les plantes médicinales

Les plantes ont toujours fait partie de la vie quotidienne de l'homme puisqu'il s'en sert pour se nourrir, se soigner et parfois dans ses rites religieux.

L'utilisation des plantes médicinales comme source de remède pour se soigner ou prévenir des maladies est originaire des millénaires jusqu'à la récente civilisation chinoise, indienne et du Proche-Orient. Elle est devenue certainement un art. Au fil des siècles, la thérapeutique par les plantes s'est dissociée des pratiques magiques pour devenir empirique puis scientifique. Cela était évident au début du 19ème siècle qui marque la découverte des alcaloïdes (la morphine, la strychnine, la quinine...).

La flore algérienne est caractérisée par sa diversité florale : méditerranéenne, saharienne et une flore paléo tropicale estimée à plus de 3000 espèces appartenant à plusieurs familles botaniques. Ces espèces sont pour la plupart spontanées avec un nombre non négligeable (15%) d'espèces endémiques. Ce qui a donné à la pharmacopée traditionnelle une richesse inestimable. Les objectifs fixés sont l'inventaire ainsi que l'évaluation chimique et pharmaceutique des plantes médicinales algériennes dans le double but de valoriser et de rationaliser leur usage traditionnel et d'isoler des composés d'intérêt thérapeutique potentiel (**Benkiki, 2006**).

Les plantes médicinales sont toutes les plantes qui auraient une activité pharmacologique pouvant conduire à des emplois thérapeutiques. Cela grâce à la présence d'un certain nombre de substances actives dont la plupart agissent sur l'organisme humain.

Elles sont utilisées en pharmacie humaine et vétérinaire, en cosmétologie ainsi que dans la confection de boissons, soit nature, soit en préparation galénique ou encore sous forme de principes actifs comme matière pour l'obtention de médicaments (**Naghibiet al., 2005 ; Babulka, 2007**).

2. Présentation de la famille des Lamiaceae

Les Lamiaceae ou Labiatae est une famille importante appartenant aux angiospermes dicotylédones. Ce sont des arbustes, sous arbrisseaux ou plantes herbacées comprennent dans le monde 258 genres et 6970 espèces (**Hennebelle, 2006**). Elle se répartissent sur tout le globe, mais principalement du bassin méditerranéen à l'Asiecentrale (**Naghibiet al., 2005**). Dans la flore de l'Algérie, les Lamiaceae sont représentées par 28 genres et 146 espèces, Certains genres sont de détermination délicate en raison de la variabilité extrême des espèces (**Quezel et Santa, 1962**). Les feuilles sont en général opposées sans stipules, les fleurs sont bisexuées et zygomorphe, les inflorescences sont en cymes axillaires plus ou moins contractées simulant souvent des verticilles, ou encore condensées aux sommets des tiges, et simulant des épis.



Figure 01 : Carte de répartition géographique mondiale de la famille des Lamiaceae (en rouge) (**Saad, 2017**).

Le calice est synsépale ou gamosépale (calice à sépales soudés formant un tube), typiquement pentamères, parfois bilabiée et porte 5 à 15 nervures protubérantes. La corolle est sympétale ou gamopétale (corolle à pétales soudés) et typiquement bilabiée avec deux lobes formant une lèvre supérieure, et trois lobes formant la lèvre inférieure. L'androcée peut consister soit en quatre étamines didynames, soit en deux étamines soudées au tube de la corolle ou à la zone périgyne et alternant avec les lobes (**Naghibiet al., 2005**).

3. Intérêt économique, pharmacologique et nutritionnel des Lamiaceae

Cette famille est une source importante d'huiles essentielles, d'infusions et d'antibiotiques dans les industries de la parfumerie et du cosmétique. Il existe de nombreuses espèces cultivées comme condiments (Sauge, Thym, Basilic, Menthe, etc....). Il existe également des plantes ornementales (Sauge, Lavande, etc...) (**Zegib, 2013**).

4. Le genre *Thymus*

Dans la famille des Lamiaceae, y compris en plus des plantes aromatiques avec une large gamme d'applications médicales et industrielles, le thymus en fait sans aucun doute, La chose la plus importante en médecine traditionnelle et en alimentation est Cosmétiques et médicaments. Ce genre comprend Environ 220 espèces aromatiques sont principalement distribués dans la région méditerranéenne (**Giovanni et al., 2018**).

5. Classification botanique

D'après **Touhami (2017)**, la systématique du genre *thymus* est la suivante :

Règne	Plantea (végétal)
Embranchement	Spermaphytes (phanérogames)
Sous embranchement	Angiospermes
Classe	Dicotylédones
Sous classe	Métachlamydées (gamopétales)
Ordre	Tubiflorales (Lamiales)
Sous ordre	Verbéninées
Famille	Labiacées (labiées)
Genre	<i>Thymus</i>

6. Description botanique

C'est un sous-arbuste de 10 à 30 cm, blanchâtre ou gris-vert, très parfumé Les tiges sont ligneuses, dressées ou ascendantes, non rayonnantes, tordues, formant de petits buissons très serré. Les rameaux sont blanchis par les villosités, le limbe des feuilles est petit, lancéolé, rhomboïde ou linéaire, émoussé, recourbé au bord, non cilié à la base, couvert Sous une pile courte et dense. Fleurs rose pâle ou blanches, haut de la tête Globuleux ou en forme de pic, partie inférieure des verticilles séparée, calice poilu, légèrement incurvé à la base (**Touhami, 2017**).

7. Répartition géographique de *Thymus*

1. Dans le monde

Le thym est réparti entre l'Europe, l'Asie occidentale et la Méditerranée. En Afrique du Nord-Ouest (Maroc, Tunisie, Algérie et Libye), en Éthiopie et Du sud-ouest de l'Arabie à la péninsule du Sinaï en Égypte. Aussi trouvé Dans la région de Macalonia (îles Canaries, Madère et Açores) et de l'Himalaya. Il peut même Atteignez la frontière entre les régions tropicales et le Japon. Au nord, il pousse en Sibérie, Europe du Nord jusqu'aux confins du Groenland (Abdelli, 2017).

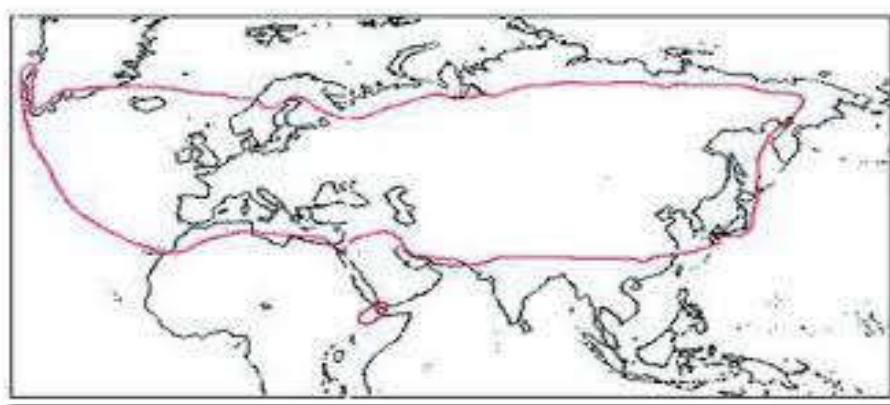


Figure 02 : Distribution géographique du thym dans le monde (Abdelli, 2017).

2. En Algérie

L'Algérie est célèbre pour sa superficie et son abondance de plantes médicinales et sa diversité bioclimatique. Le thym est une plante largement répandue en Algérie. Différentes espèces du nord de l'Algérie à l'Atlas du désert du Sahara, la zone est répartie sur tout le territoire du pays, de Constantine à Oran (Touhami, 2017) (Tableau 02).

Tableau 2 : Localisation des principales espèces de thym en Algérie (Touhami, 2017).

Espèce	Découvert e Par	Localisation	Nom local
<i>Thymus capitatus</i>	Hoffman et Link	Rare dans la région de Tlemcen.	-
<i>T. fontanesii</i>	Boiss et Reuter	Commun dans le Tell Endémique Est Algérie-Tunisie.	-
<i>T. munbyanus</i>	Boiss et Reuter	Endémique dans le secteur Nord Algérois.	Djertil
<i>T. commutatus</i>	Battandier	Endémique Oran.	
<i>T. numidicus</i>	Poiret	Assez rare dans : -Le sous-secteur de l'atlas tellien, -La grande et la petite Kabylie, -De Skikda à la frontière tunisienne, -Tell constantinois.	Tizaàt arte
<i>T. guyonii</i>	Noé	Rare dans le sous-secteur Des hauts plateaux algérois, oranais et Constantinois	-
<i>T. lancéolatus</i>	Desfontai ne	Rare dans : Le secteur del'atlas tellien (Terni De Médéa Benchicao) et dans le soussecteur des hauts plateaux algérois, Oranais (Tiaret) et constantinois.	Zaàteu r
<i>T. pallidus</i>	Coss	Très rare dans le sous-secteur de L'Atlas Saharien et constantinois	Tizerd ite
<i>T. hirtus</i>	Willd	Commun sauf sur le littoral.	Djertil /Hamr ya
<i>T. glandulosus</i>	Lag	Très rare dans le sous-secteur des hauts plateaux algérois.	
<i>T. algeriensis</i>	Boiss et Reuter	Très commun dans le soussecteur des hauts plateaux algérois, oranais.	Djertil Zaitra

3. Exigences climatiques et de plantation du genre *Thymus*

Le tableau suivant regroupe les exigences climatiques et de plantation du genre *Thymus*

Tableau 3 : Exigences climatiques et de plantation du genre *Thymus* (Ghasemi Pirbalouti *et al.*, 2015).

Paramètre	Description
Température	Climat chaud, sec, ensoleillé et où les plantes ne sont pas ombragées.
Pluviométrie	N'aime pas l'humidité excessive en raison de sa sensibilité aux maladies de la pourriture. Convient de 500 à 1000 mm par an.
Exigences du sol	Sols légers et bien drainés avec un pH de 5,0 à 8,0.
Saison de plantation	Boutures de transplantation : au printemps.
Propagation	Graines, boutures de tige et stratification.
Irrigation	L'irrigation goutte à goutte et aérienne conviennent, mais ne sur-irriguez pas.
Espacement	15 à 30 cm de distance dans le rang avec une largeur de rang de 60 cm.

Chapitre II.

Métabolites secondaires

II.1. Généralités

Les effets pharmacologiques vastes et polyvalents des plantes médicinales dépendent essentiellement de leurs constituants phytochimiques. En général, les constituants phytochimiques des plantes se répartissent en deux catégories en fonction de leur rôle dans les processus métaboliques de base, à savoir les métabolites primaires et secondaires. Les métabolites végétaux primaires sont impliqués dans les fonctions vitales de base ; par conséquent, ils sont plus ou moins similaires dans toutes les cellules vivantes (**Rehab et al., 2018**).

D'autre part, les métabolites végétaux secondaires sont des produits de voies subsidiaires comme la voie de l'acide shikimique. Au cours de l'étude, l'effet médicinal des herbes est orienté vers les métabolites végétaux secondaires. Les métabolites végétaux secondaires ont joué un rôle important dans le soulagement de plusieurs aliments dans la médecine traditionnelle et les usages populaires (**Rehab et al., 2018**).

II.2. Classification des métabolites

Les réactions chimiques qui ont lieu dans le protoplasme des cellules végétales donnent naissance à deux types de produits : les métabolites primaires et les métabolites secondaires.

II.2.1. Métabolites primaires

Les métabolites primaires comprennent de petites molécules telles que les sucres, les acides aminés, les acides tricarboxyliques ou les intermédiaires du cycle de Krebs, les protéines, les acides nucléiques et les polysaccharides. Finalement, les métabolites primaires sont similaires dans toutes les cellules vivantes (**Rehab et al., 2018**).

II.2.2. Métabolites secondaires

On appelle métabolites secondaires des composés biosynthétisés naturellement par les végétaux mais qui ne participent pas directement au métabolisme végétal(**Rehab et al., 2018**).

Un métabolite secondaire est une molécule qui, par exclusion, n'appartient pas au métabolisme primaire. Les métabolites secondaires sont historiquement plus spécifiques aux plantes, bactéries et champignons, mais on dé couvre également des métabolismes spécifiques à certains groupes animaux.

Contrairement aux métabolites primaires, ils ne participent pas directement au développement de l'organisme (la plante, typiquement). Cependant, ces composés ne sont pas totalement différents des métabolites primaires. En effet, ils dérivent parfois des mêmes voies de biosynthèse et certains, comme la chlorophylle et la lignine ont des fonctions indispensables pour la croissance de la plante, et pourraient donc faire partie des métabolites primaires (Meratate., 2017).

Les métabolites secondaires des plantes sont divisés en trois catégories selon leur structure chimique : les phénols, les alcaloïdes et les terpènes (Meratate., 2017). Ils constituent un groupe de produits naturels, ils ont une variété de propriétés, notamment des antioxydants, Antibactérien, anti-inflammatoire, anti-cancer, etc. Il existe de nombreux produits du métabolisme secondaire, avec plus de 200 000 structures définies et des changements structuraux anormaux, mais le rendement est faible (Chahrazed, 2018).

II.3. Classification des métabolites secondaires

Les métabolites secondaires peuvent être divisés en trois groupes distincts : les composés phénoliques, les alcaloïdes, et les terpènes (Rehab *et al.*, 2018).

II.3.1. Les composés phénoliques

Les composés phénoliques sont des métabolites secondaires d'un poids moléculaire élevé, largement distribués dans le règne végétal. Ils sont des molécules aromatiques constituées d'un groupement phényle (C6) et d'un hydroxyle (-OH). Ils sont caractérisés, comme l'indique le nom, par la présence de plusieurs groupements phénoliques associés en structures plus ou moins complexes. On peut nommer dans cette famille les acides phénoliques les flavonoïdes et les tanins (et lignines). La plupart de ces composés phénoliques dérivent d'acides aminés aromatiques : la tyrosine et la phényl alanine. (Karoune, 2016).

- **Les acides phénoliques:** Un acide phénolique ou acide-phénol est un composé organique possédant au moins une fonction carboxylique et un hydroxyle phénolique (Meriane, 2018).
- **Les flavonoïdes :** Les flavonoïdes (ou bioflavonoïdes) sont des métabolites secondaires des plantes partageant tous une même structure de base à 15 atomes formée par deux cycles aromatiques reliés par trois carbones (C6-C3-C6) (Wang, 2012).
- **Les Tanins:** Les tanins sont des polyphénols polaires du poids moléculaire compris entre 500 et 3000 Da. Ils sont constitués soit de polyol (glucose le plus souvent) des acides phénoliques soit d'oligomères ou polymères de flavonoïdes (Marouf et Reynaud, 2007).

Les composés phénoliques correspondent à une grande variété de substances possédant un cycle aromatique portant au moins un groupement hydroxyle. Certains phénols peuvent avoir les propriétés physiologiques concernant la régularisation de la croissance et du développement, comme l'acide lunularique, un acide dihydro-stilbène- carboxylique qui aurait le rôle d'hormone de type dormine (= acide abscissique) chez l'hépatique *Lunulariacruciata*. Mais le rôle écologique de ces composés phénoliques reste le plus important en effet les pigments flavonoïdes (en association avec les caroténoïdes) contribuent à l'attraction des animaux vis-à-vis des fruits et des fleurs colorés à disperser ou polliniser. De plus, ils sont parfois excrétés de la plante et peuvent affecter la croissance des autres plantes dans l'environnement immédiat (phénomène d'allélopathie) (**Kechida etmechiche,2019**) Certains flavonoïdes et surtout les tanins, astringents, sont des antiappétants protégeant les plantes de la prédation de nombreux animaux. Ils peuvent également être toxiques pour les insectes : l'acide chlorogénique, très courant, en association avec le flavonoïde la «rutine» des trichomes des feuilles de la tomate est toxique pour *Heliothiszea*. Enfin certaines classes de phénols agissent comme agents antimicrobiens pour diverses bactéries, virus et champignons (**Le Claire, Schwaiger, 2005**).

II.3.2. Les Alcaloïdes

Les alcaloïdes sont des composés azotés complexes, de nature basique, dérivant des acides aminés par des voies de biosynthèse longues et complexes. Ce groupe contient plus de 10.000 composés, dont le premier est la narcotine (nascapine) de l'Opium, découvert en 1803 par Derosne. Ils sont classifiés selon leur hétérocycle (**Marouf et Reynaud, 2007**). Ces composés présentent diverses activités biologiques. Ce sont pour la plupart des poisons végétaux très actifs comme la strychnine. Selon leur composition chimique et surtout leur structure moléculaire, on peut les diviser en plusieurs groupes (**Sahabi, 2009**) :

- **Alcaloïdes isoquinoléiques:** morphine, éthylmorphine, codéine et papavérine contenues dans l'opium du pavot.
- **Alcaloïdes quinoléiques :** tige feuillée de la rue commune.
- **Alcaloïdes pyridiques et pipéridiques :** ricinine du ricin, trigonelline du fenugrec, conine (poison violent) de la ciguë.
- **Alcaloïdes dérivés du tropane :** scopolamine et atropine de la belladone.
- **Alcaloïdes stéroïdes:** racine de véatrate, douce-amère ou aconite (aconitine).

Le principal rôle des alcaloïdes est de défendre la plante contre les mammifères et les insectes. Leur mode d'action dépend de l'espèce végétale : quelques plantes possèdent des alcaloïdes qui entraînent des syndromes neurologiques. Ces espèces ont provoqués de nombreuses intoxications et la mort de bétails. Pour les plantes de type digitale, la digitaline entraîne une augmentation des contractions cardiaques voire un arrêt cardiaque selon la dose (Benavides *et al.*, 2007).

II.3.3. Les terpènes

Les terpènes forment une classe de substances naturelles organiques dont beaucoup sont rencontrées quotidiennement et dont les noms traduisent souvent un caractère familier (Bouhabila et Bourahl, 2019). Elles comprennent le menthol, à l'origine de l'odeur des crayons de bois, l'acide abiétique, constituant important de la résine des pins, les gommes naturelles et la gutta-percha utilisée pour faire les enveloppes des balles de golf, la bétuline, pigment blanc de l'écorce de bouleaux, le β -carotène, pigment orange des carottes et de nombreuses baies, le caoutchouc, très variés tant structuralement que du point de vue de leurs activités biologiques, les composés de ce groupe, constitués uniquement des éléments carbone, hydrogène et oxygène, comportent des huiles essentielles, des résines, des stéroïdes et des polymères comme le caoutchouc (Meyer *et al.*, 2004). Leur chaîne carbonée est constituée d'unités isoprène à cinq atomes de carbone, assemblés d'abord en une chaîne insaturée qui est ensuite modifiée par oxydation, réduction ou élimination de carbone (Boumaza, 2017).

La forme activée de l'isoprène qui sert de précurseur à la biosynthèse de ces composés est l'isopentényl diphosphate (IPD) formé à partir de l'acétyl-CoA. L'isomère prényl diphosphate de ce composé sert d'amorce à la biosynthèse.

II.3.3.1. Les monoterpènes

Ils constituent la majeure partie des huiles essentielles qui sont présentes en quantité appréciable chez environ 2000 espèces de 60 familles végétales. Ils sont rares chez les Légumineuses. Parfois simplement formées dans le cytosol, ces huiles se rassemblent en gouttelettes ou s'accumulent dans les vacuoles des cellules épidermiques ou du mésophyle de nombreux pétales, ou encore dans des cellules oléifères. Quand la température est élevée, ces essences traversent la paroi cellulaire et la cuticule sous forme de vapeur (parfum de fleurs). Mais souvent, des cellules glandulaires les éliminent activement dans des compartiments intercellulaires ou les rejettent vers l'extérieur du végétal.

Ils comportent 10 atomes de carbone, et sont issus des couplages de deux unités isopréniques (**Bouhabila et Bourahla,2019**). Ils sont pourvus d'une grande diversité structurale. Leur squelette peut être acyclique, mono, bi, et tricyclique.

II.3.3.2. Les sesquiterpènes

Le squelette de base de ces composés est constitué de 15 atomes de carbone. Depuis l'isolement du farnésol), sesquiterpène linéaire très répandu dans le monde végétal (parfum), le nombre de molécules sesquiterpéniques n'a cessé de croître : Les composés actuellement décrits se rattachent à plus de 100 squelettes différents (**Ayoub, 2003**).

II.3.3.3. Les diterpènes

Les diterpènes forment un vaste ensemble de composés en C₂₀, issus du métabolisme du 2E, 6E, 10E, GGPP. Leur représentant le plus simple est le géranylgeraniol. Les diterpènes sont présents chez certains insectes et chez divers organismes marins, ils sont surtout répandus chez les végétaux supérieurs, on les classe en fonction de leur diversité structurale (**Ono et al.,2008**).

II.3.3.4. Les triterpènes

Les triterpènes sont des composés en C₃₀, issus de la condensation de six molécules d'isoprène, ils forment un groupe important de produits naturels. Ces composés et leurs dérivés sont intégralement biosynthétisés par tous les êtres vivants avec deux exceptions : les bactéries qui ne les utilisent pas et les insectes qui les empruntent aux plantes souvent de façon spécifique puis les transforment.

Le véritable précurseur universel de tous les terpènes est l'acide mévalonique, la première étape est l'activation de la molécule d'acide acétique. Ceci est réalisé par estérification avec le groupe thiol d'une molécule complexe, le coenzyme A « HS-CoA ». Le méthyle du thiol-ester formé, l'acétyl-CoA est très réactif (**Bouras,2019**).

Constituants d'huile essentielle

La composition chimique des huiles essentielles de *Thymus* a été étudiée par plusieurs groupes de recherche Jusqu'à présent (**Tableau 4**).

Des études chimiques antérieures sur des espèces de *thymus* ont montré la présence de terpènes et terpénoïdes aromatiques, de flavonoïdes et d'acides phénoliques. Le thymol et le carvacrol sont les principaux composés phénoliques de l'huile de thym (**Tableau 5**).

Les principaux composés non phénoliques sont le linalol et le p-cymène. Dans deux études distinctes, les huiles essentielles de plantes de thym ont été étudiées et ont constaté que les huiles essentielles contenaient du carvacrol, du thymol, du gamma-terpinène, du p-cymène et du bornéol.

Malgré la rare autopolinisation, les différents composants des huiles essentielles dans différents types de thymus sont variables en raison de l'hybridation et de la polypléidisation.

En général, par rapport aux caractéristiques relatives de la plante mère, les hybrides intraspécifiques du genre *Thymus* semblent contenir des huiles essentielles. L'huile de thym contient des acides polyphénoliques (acide oléique, acide rosmarinique, triterpènes et acide caféique). L'huile de thym contient également d'autres ingrédients tels que le bornéol, le géraniol, le pinène, le linalol, le 1-8, le cinéole, la sabinine, le myrcène et le limonène (**Ghasemi Pirbalouti *et al.*, 2015**).

II.4. Méthodes d'extraction des métabolites secondaires

Les progrès récents dans l'extraction de composés bioactifs à partir de matériel végétal ont fait l'objet d'un examen approfondi, probablement en raison de la sensibilisation accrue du public aux soins de santé préventifs qui pourraient être favorisés par la consommation d'extrait de matériel végétal (**Azmiret *al.*, 2013 ; Wang et Weller, 2006**).

II.4.1. Techniques conventionnelles d'extraction

Diverses techniques conventionnelles d'extraction peuvent être utilisées pour extraire des composés bioactifs à partir de plantes. La plupart de ces technologies sont basées sur les capacités d'extraction des différents solvants utilisés et l'application de chaleur et/ou de mélange. Afin d'obtenir des composés bioactifs à partir de plantes, les techniques classiques existantes sont : (1) l'extraction au Soxhlet, (2) la macération et (3) l'hydrodistillation (**Azmiret *al.*, 2013**). Ces méthodes d'extraction utilisent des solvants organiques tels que l'hexane, l'acétone, le méthanol, l'éthanol, etc. ou de l'eau, et sont généralement réalisées sous pression atmosphérique. L'utilisation de solvants organiques et le long processus d'extraction sont les principaux inconvénients des méthodes conventionnelles.

II.4.2. Techniques non conventionnelles d'extraction

Afin d'atténuer les limites des méthodes conventionnelles d'extraction, des méthodes alternatives aux méthodes conventionnelles d'extraction ont vu le jour. Ces nouvelles méthodes comprennent l'extraction accélérée par solvant (ASE), l'extraction par fluide supercritique (SFE), l'extraction assistée par micro-ondes (MAE), l'extraction assistée par ultrasons (EAU), l'extraction à l'eau sous-critique (SWE), l'extraction par champ électrique pulsé (PEF), l'extraction assistée par enzyme (EAE), l'extraction liquide sous pression (PLE) et l'extraction dynamique solide-liquide rapide (RSLDE). À cet égard, l'accent est mis sur ASE, SFE, MAE, UAE et SWE, car ce sont les méthodes les plus largement utilisées pour extraire des molécules bioactives à partir de plantes (Azmiret *et al.*, 2013).

II.5. Les principaux métabolites isolés du genre *Thymus*

II.5.1. Acides phénoliques isolés du genre *Thymus*

Les acides phénols sont des dérivés de l'acide benzoïque (composés en C6-C1) tels que l'acide gallique élément constitutif des tanins hydrolysables ou de l'acide cinnamique (composés en C6-C3) comme l'acide caféique qui sont souvent estérifiés.

Quinze acides phénoliques sont répertoriés au niveau du genre *Thymus*. Les dérivés de l'acide cinnamique ont été les plus abondants chez plusieurs espèces de ce genre. Seulement quatre acides hydroxybenzoïques sont répertoriés : trois sont cités dans une seule espèce de ce genre : *Thymus capitatus*(L.) Hoff. Et Link et un autre dans les espèces *Thymus vulgaris* L. Et *Thymus comosus* Heuff (Tableau 1):

Tableau 01: Distribution des acides phénoliques dans le genre *Thymus*.

Acide phénolique isolés	Espèce(origine)	Référence
Acides phénoliques dérivés de l'acide benzoïque: acides hydroxybenzoïques		
<i>Acide vanillique</i>	<i>T. capitatus</i> (L.) Hoff. Et Link (Tunisie)	<i>Jabriet al., 2012</i>
<i>Acide gallique</i>	<i>T. capitatus</i> (L.) Hoff. Et Link (Tunisie)	<i>Jabriet al., 2012</i>
<i>Acide syringique</i>	<i>T. capitatus</i> (L.) Hoff. Et Link (Tunisie)	<i>Jabriet al., 2012</i>
<i>Acide p-coumarique</i>	<i>T. vulgaris</i> L (Romanie)	<i>Angela et al., 2008</i>
<i>Acide p-coumarique</i>	<i>T. comosus</i> Heuff. (Romanie)	

Tableau 01 (la suite) : Distribution des acides phénoliques dans le genre *Thymus*.

Acides phénoliques dérivés de l'acide cinnamique : acides hydroxy cinnamiques		
Acide p-coumarique	<i>T.capitatus</i> (L.) Hoff. Et Link (Tunisie)	<i>Jabri et al., 2012</i>
	<i>T.glabrescens</i> Willd. (Angarie)	<i>Borose et al., 2010</i>
	<i>T.pulegioides</i> L. (Angarie)	<i>Borose et al., 2010</i>
	<i>T.serpyllum</i> L. (Angarie)	<i>Borose et al., 2010</i>
	<i>T.vulgaris</i> L. (Romanie)	<i>Angela et al., 2008</i>
	<i>T.comosus</i> Heuff. (Romanie)	<i>Angela et al., 2008</i>
	<i>T. pulegioides</i> L. (Romanie)	<i>Mariana et al., 2007</i>
	<i>T. vulgaris</i> L. (Egypte)	<i>Roby et al., 2013</i>
		<i>Jabriet al., 2012</i>
Acide caféique	<i>T. capitatus</i> (L.) Hoff. Et Link (Tunisie)	<i>Borose et al., 2010</i>
	<i>T.glabrescens</i> Willd. (Angarie)	<i>Borose et al., 2010</i>
	<i>T.pulegioides</i> L. (Angarie)	<i>Borose et al., 2010</i>
	<i>T.serpyllum</i> L. (Angarie)	<i>Angela et al., 2008</i>
	<i>T.vulgaris</i> L. (Romanie)	<i>Angela et al., 2008</i>
	<i>T.comosus</i> Heuff. (Romanie)	<i>Angela et al., 2008</i>
	<i>T. pulegioides</i> L. (Romanie)	<i>Mariana et al., 2007</i>

Tableau 01 (la suite): Distribution des acides phénoliques dans le genre *Thymus*.

Acide phénolique isolés	Espèce (origine)	Référence
Acide férulique	T.vulgarisL.(Egypte)	Roby et al.,2013
	T. capitatus(L.)Hoff. Et Link(Tunisie)	Jabriet al.,2012
	T.glabrescensWilld.(Angarie)	
	T.pulegioidesL.(Angarie)	Boroset al.,2010
	T.serpyllumL.(Angarie)	Boroset al., 2010
	T.comosusHeuff.(Romanie)	2010Borosetal.,2010
	T. pulegioidesL.(Romanie)	Angela et al., 2008
	T. capitatus(L.)Hoff. Et Link(Tunisie)	Mariana et al., 2007
	T.vulgarisL.(Egypte)	Jabriet al.,2012
	T. capitatus(L.)Hoff. Et Link(Tunisie)	Robyetal.,2013
Acide trans-2-Hydroxycinnamique Acide chlorogénique	T.glabrescensWilld.(Angarie)	Jabriet al.,2012
	T.pulegioidesL.(Angarie)	Boroset al., 2010
	T.serpyllumL.(Angarie)	Boroset al., 2010
	T.vulgarisL.(Romanie)	Boroset al., 2010
	T.comosusHeuff.(Romanie)	Angela et al., 2008
	T.vulgarisL.(Egypte)	Angela et al., 2008
	T. capitatus(L.)Hoff. Et Link(Tunisie)	Robyet al.,2013
	T.glabrescensWilld.(Angarie)	
	T.pulegioidesL.(Angarie)	Jabriet al., 2012
	T. capitatus(L.)Hoff. Et Link(Tunisie)	Boroset al., 2010
Acide rosmarinique	T.glabrescensWilld.(Angarie)	Boroset al., 2010
	T.praecoxOpiz.(Angarie)	Boroset al., 2010
	T.pulegioidesL.(Angarie)	Boroset al., 2010
	T.serpyllumL.(Angarie)	Boroset al., 2010
	T.vulgarisL.(Romanie)	Angela et al., 2008
	T.comosusHeuff.(Romanie)	Angela et al., 2008
	T.vulgarisL.(Romanie)	Angela et al., 2008
	T.comosusHeuff.(Romanie)	Angela et al., 2008
	T.pulegioidesL.(Romanie)	Marianaetal.,2007
	T.vulgarisL.(Romanie)	
Acide Caftarique	T.vulgarisL.(Romanie)	
	T.comosusHeuff.(Romanie)	
	T.pulegioidesL.(Romanie)	
	T.vulgarisL.(Romanie)	
	T.comosusHeuff.(Romanie)	
	T.pulegioidesL.(Romanie)	
	T.vulgarisL.(Romanie)	
	T.comosusHeuff.(Romanie)	
	T.pulegioidesL.(Romanie)	
	T.vulgarisL.(Romanie)	

Tableau 01 (la suite): Distribution des acides phénoliques dans le genre *Thymus*.

Acide phénolique isolés	Espèce(origine)	Référence
Autres acides phénoliques		
Acide Carnosique	T.vulgarisL.(Egypte)	Robyetal.,2013
Methylrosmarene	T.vulgarisL.(Egypte)	Roby et al.,2013
Acide quinique	T.vulgarisL.(Egypte)	Robyetal.,2013

II.5.2. Flavonoïdes isolés du genre *Thymus*

Les principaux métabolites secondaires du genre *Thymus* sont les flavonoïdes. La lutéoline et la 6-hydroxyluté ont des chémo marqueurs de la sous famille des Nepetoideae et en particulier des espèces *Thymus*, la thymusine (5,6dihydroxy-7,8,4'-triméthoxy flavone) est aussi caractéristique de cette sous-famille (**Kabouche, 2005**). La distribution des flavonoïdes dans les espèces du genre *Thymus* est représentée dans le **tableau 2**.

Tableau 02 : Distribution des flavonoïdes dans les espèces du genre *Thymus*.

Flavonoïde isolés	Espèce(origine)	Référence
Flavones aglycones		
Lutéoline		
T. capitatus (L.) Hoff.	Et Jabri et al., 2012	
T. numidicus	Poiret Benkiniouar et al., 2010	
T. vulgaris L.	Bazylko et al., 2007	
T. vulgaris L.	Miura et al., 2002	
T. broussonetii	Boiss Ismaili et al., 2002	
T. herbabarona	Corticchiato et al., 1995	Méthoxylutéoline
T. vulgaris L.	Miura et al., 2002	
T. vulgaris L.	Miura et al., 1989	
T. membranaceus subsp.	Ferreres et al., 1985	Membranaceus
Apigénine		
T. capitatus (L.) Hoff.	Et Jabri et al., 2012	
T. glabrescens Willd.	Boros et al., 2010	
T. praecox Opiz	Boros et al., 2010	
T. serpyllum L.	Boros et al., 2010	
T. numidicus	Poiret Benkiniouar et al., 2010	
T. hirtus	Merghem et al., 1995	
Diosmétine	T. hirtus Merghem et al., 1995	
Chrysoérol	T. membranaceus subsp. Ferreres et al., 1985	
Membranaceus 7-Méthoxyapigénine	T. vulgaris L. Miura et al., 1989	
4'-Diméthoxyapigénine		
T. vulgaris L.	Miura et al., 1989	
Flavones glycosidiques		
Lutéolin-7-O-D-glucoside	T. broussonetii	Boiss Ismaili et al., 2002
Lutéolin-7-O-D-glucuronide	T. wilddenowii	Boiss Ismaili et al., 2001
Lutéolin-3'-O-D-glucuronide	T. broussonetii	Boiss Ismaili et al., 2002
	T. wilddenowii	Boiss Ismaili et al., 2001

Tableau 02 (la suite) : Distribution des flavonoïdes dans les espèces du genre *Thymus*.

Flavonoïde isolé	Espèce(origine)	Référence
Apigénin-7-O-lucosyl (1→2) glucoside	T.glabrescens Willd.T. praecox Opiz T. serpyllum .	Boros et al.,2010
Flavanones		
Naringenine	T.pulegioidesL.	Boros et al.,2010
	T.serpyllumL.	Boros et al.,2010
	T.glabrescensWilld.	Boros et al.,2010
	T.praecoxOpiz	Boros et al.,2010
	T.herbabarona	Cortichiatto et al., 1995
Dihydro quercetine	T.pulegioidesL.	Boros et al.,2010
	T.serpyllumL.	Boros et al.,2010
	T.glabrescensWilld.	Boros et al.,2010
Eriodictyol	T.praecoxOpiz	Boros et al.,2010
	T.pulegioidesL.	Boros et al.,2010
	T.serpyllumL.	Boros et al.,2010
	T.glabrescensWilld.	Boros et al.,2010
	T.praecoxOpiz	Boros et al.,2010
	T.herbabarona	Cortichiatto et al.,1995
B.Flavonols		
Quercetine	T.capitatus (L.) Hoff. Et Link T. pulegioides L. T.serpyllumL.	Jabri et al.,2012
	T.glabrescensWilld.	
	T.praecoxOpiz	

Rutine	T.pulegioidesL.	Boroset al., 2010
	T.serpyllumL.	Boroset al., 2010
	T.glabrescensWilld.	Boroset al., 2010
	T.praecoxOpiz	Boroset al., 2010
		Boroset al., 2010
		Boroset al., 2010
		Boroset al.,2010
		Boroset al.,2010

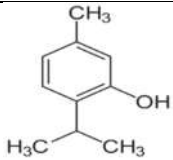
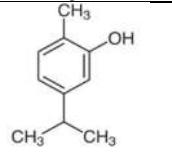
Tableau 4 : Composition chimique de l'huile essentielle de différentes espèces de *Thymus*

Espèces	Pa ys	Composition majoritaires	Références
<i>Thymus pulegeoide</i>	Bu lg ari e	Néral 18,7% Géravial 58,8%	Domokos <i>et al.</i> ,1995
<i>Thymus revolutus</i>	Tu rq ui e	Carvacrol 43,13% γ - terpinène 20,86% p-cymène 13,94%	Karaman <i>et al.</i> ,2001
<i>Thymus bleicherianus</i>	M ar oc	Carvacrol 70,92% p-cymène 6,34	El Ajjouri <i>et al.</i> ,2008
<i>Thymus capitatus</i>	M ar oc	α – terpinène 42,23% Thymol 23,95	El Ajjouri <i>et al.</i> ,2008
<i>Thymus numidicus poiret</i>	Al gé rie (C on sta nti ne)	Thymol 23,92% Linallol 17,20% γ –terpinène 10,84%	Zeghib <i>et al.</i> ,2013

Tableau 4 : Composition chimique de l'huile essentielle de différentes espèces de *Thymus*

<i>Thymus numidicus</i>	Algérie	Thymol 60,80% p-cymène 10,30% γ -terpinène 7,60%	Giordani <i>et al.</i> , 2008
<i>Thymus algeriensis</i>	Algérie	Thymol 71,45% Linalool 7,89%	Chemat <i>et al.</i> , 2012
<i>Thymus algeriensis</i>	Maroc	Camphre 27,70% α -pinène 20,50%	Amarti <i>et al.</i> , 2008
<i>Thymus ciliatus</i>	Maroc	Thymol 44,2% E-ocimène 25,8% α -terpinène 12,3%	Amarti <i>et al.</i> , 2008

Tableau 5 : Propriétés du thymol et du carvacrol (Ghasemi Pirbalouti *et al.*, 2015)

	Thymol	Carvacrol
Nom	2-isopropyl-5-méthylphénol	5-isopropyl-2-méthylphénol
Couleur	blanc cristallin	blanc-jaune
Structure moléculaire		
Masse moléculaire	150,22	150,21
Point d'ébullition	233 °C	236-237 °C
Indice de réfraction	1,522 dans 20 °C	1,5209 dans 20 °C
Solvant	Alcool et solvants organiques	Alcool et solvants organiques

Chapitre III.

Activité antioxydante du genre *Thymus*

Rappel sur l'activité anti-oxydante

III.1. Stress oxydatif

La vie en aérobie se traduit au niveau cellulaire par l'existence d'une chaîne respiratoire mitochondriale (**Curzay et Robin, 2000**) ; au niveau de laquelle l'oxygène est normalement transformé en eau. Cette réaction de réduction implique quatre électrons, et est rendue grâce à un système complexe de protéines et d'enzymes (cytochromes). Elle permet d'apporter à la cellule toute l'énergie nécessaire sous forme d'adénosine triphosphate (ATP) pour assurer ses fonctions vitales. Ce processus mitochondrial n'est toutefois pas parfait, 2 à 5% de l'oxygène est transformé en espèces réactives oxygénées (ERO) ou réactive oxygène species (ROS) (**Gueye, 2007**); qui sont des formes variées de l'oxygène active, elles incluent les radicaux libres comme l'anion superoxyde ($O_2^{\cdot-}$) d'où le symbole « $\cdot$ » indique la présence d'un électron célibataire, le signe « $-$ » une charge électronique négative (**Vansant, 2004**) et le radical hydroxyle ($\cdot OH$), et les espèces non radicalaires qui sont des oxydants et/ou facilement transformées en radicaux comme le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) (**Halliwell et Whiteman, 2004**).

Les radicaux libres oxygénés sont des espèces chimiques (atomes ou molécules) qui possèdent un ou plusieurs électrons célibataires (électron non apparié) sur leur couche externe (**Gueye, 2007**). Cela leur confère une grande réactivité chimique (**Dacosta, 2003**).

Le stress oxydatif est le déséquilibre entre la génération des espèces oxygénées réactives (EOR) et la capacité du corps à les neutraliser et à réparer les dommages oxydatifs (**Boyd et al., 2003**).

Il sera la principale cause initiale de plusieurs maladies : cancer, cataracte, sclérose latérale amyotrophique, syndrome de détresse respiratoire aigu, œdème pulmonaire, vieillissement accéléré, maladies cardiovasculaires...etc (**Favier, 2003**).

III.2. Antioxydants

Un antioxydant est défini comme étant toute molécule, à concentration relative ment faible, capable d'entrer en compétition avec d'autres substrats oxydables et peut retarder, inhiber ou empêcher l'oxydation des substrats biologiques (**Boyd et al., 2003**), ce sont des composés qui réagissent avec les EOR et les rendent ainsi inactifs (**Vansant, 2004**).

III.2.1. Antioxydants enzymatiques

Cette ligne de défense est constituée principalement de trois enzymes. Il s'agit du superoxyde dismutase (SOD), de la catalase et de glutathion peroxydase (GPX). Ces enzymes ont une action complémentaire sur la cascade radicalaire au niveau du superoxyde et du peroxy de d'hydrogène, conduisant finalement à la formation d'eau et d'oxygène moléculaire (Lehucher-Michelet al., 2001).

III.2.2. Antioxydants non enzymatiques

Ce groupe des antioxydants renferme les protéines séquestration des métaux, qui agissent en diminuant la disponibilité d'agents pro oxydants, comme $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ ou $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^{+}$.

D'autre part, il y a des molécules à faible poids moléculaire qui agissent soit comme cofacteurs des enzymes citées soit comme antioxydant propre (Antwerpen, 2006).

Les antioxydants à action directe sont capables de donner des électrons à l'oxygène radicalaire afin qu'ils puissent le piéger, l'empêcher ainsi d'attaquer les structures biologiques. Ils peuvent agir comme agents réducteurs capables de passer leurs électrons aux ROS et les éliminer (Kohen et Nyska, 2002).

III.3. Méthodes d'évaluation de l'activité antioxydante

Les méthodes utilisées pour évaluer l'activité antioxydante des huiles essentielles sont relativement peu nombreuses et font intervenir en général la coloration ou la décoloration d'un réactif spécifique en présence d'agent antioxydant.

III.3.1. Méthode du DPPH

Le radical libre DPPH est un radical azoté organique avec une couleur purple foncé. Lorsqu'une solution de DPPH est mélangée à un antioxydant, sa couleur passe du violet au jaune de l'hydrazine correspondante (Figure 5).

La capacité de réduction des antioxydants vis-à-vis du DPPH peut être évaluée en surveillant la diminution de son absorbance à 515–528 nm. Les résultats sont exprimés en IC_{50} ou en % de piégeage de DPPH à une concentration d'antioxydant fixe pour tous les échantillons.

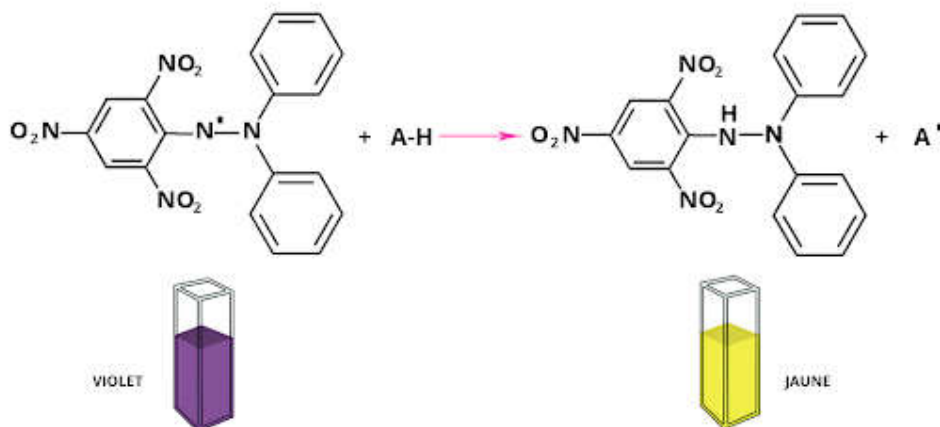


Figure 03 : Réaction entre DPPH • et antioxydant pour former DPPH.

III.3.2. Méthode de l'ABTS

L'ABTS peut être oxydé par le persulfate de potassium ou le dioxyde de manganèse. Le radical ABTS ($\text{ABTS}^{\bullet+}$) qui absorbe à 743 nm (donnant une couleur verte) a été formé en perdant un électron par l'atome d'azote de l'ABTS (**Figure 6**). En présence de Trolox (ou d'un autre hydrogène donneur d'antioxydant), l'atome d'azote a éteint l'hydrogène atome, ce qui donne la décoloration de la solution et l'absorbance à 743 nm a été diminué.

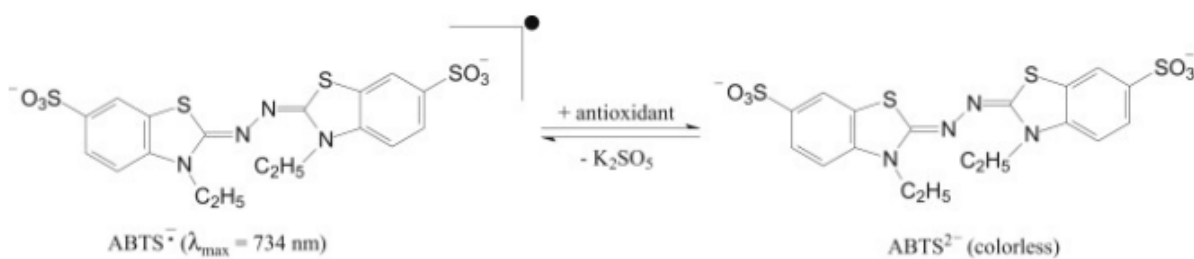


Figure 04 : Formation d'un radical ABTS stable à partir d'ABTS avec du persulfate de potassium.

III.3.3. Méthode du FRAP

Le test **FRAP** repose sur la réduction de Fe^{3+} -TPTZ (2,4,6-tri (2-pyridyl) -1,3,5-triazine) pour produire Fe^{2+} -TPTZ par les antioxydants. La liaison de Fe^{2+} au ligand crée un bleu marin très intense couleur (**Figure 7**). L'absorbance à 593 nm peut être mesurée pour tester la quantité de fer réduite et peut être corrélée à la quantité d'antioxydant.

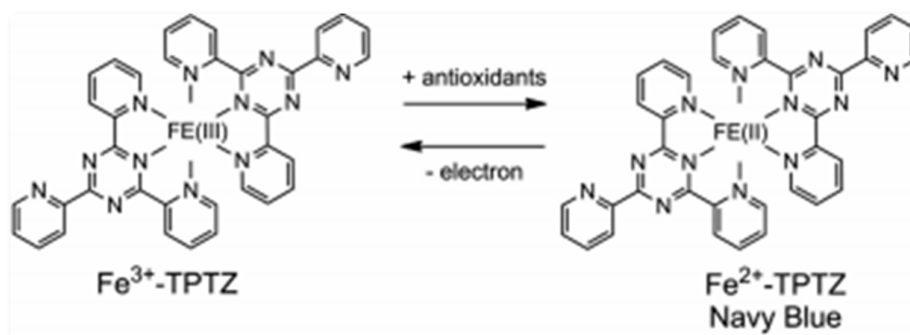


Figure 05 : Formation du complexe (Fe^{2+} -TPTZ) à partir du complexe (Fe^{3+} -TPTZ) par des antioxydants.

III.3.4. Méthode de CUPRAC

Dans le test de CUPRAC, les échantillons ont été mélangés avec CuSO_4 et néocuproïne. $\text{Cu}(\text{II})$ a été réduit en $\text{Cu}(\text{I})$ par l'action de antioxydants donneurs d'électrons (**Figure 8**).

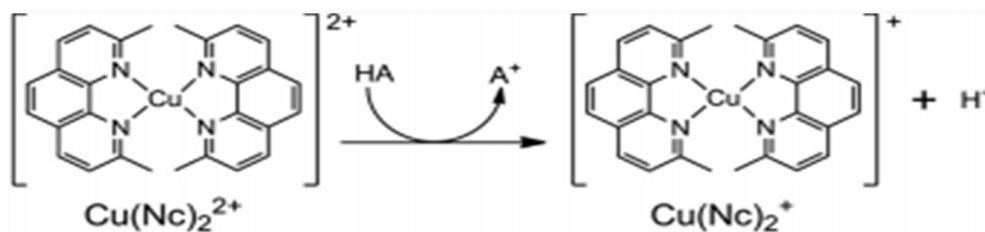


Figure 06 : Formation de $\text{Cu}(\text{Nc})^+$ à partir de $\text{Cu}(\text{Nc})_2^{2+}$ par antioxydant.

III.3.5. Méthode du PFRAP

Une augmentation d'absorbance peut être corrélée à la capacité de réduction d'antioxydants / extraits antioxydants. Les composés antioxydants capacités de réaction avec le ferriocyanure de potassium ($K_3 [Fe (CN)_6]$) pour former ferrocyanure de potassium ($K_4 [Fe (CN)_6]$). Ce dernier réagit avec ferrique trichlorure, donnant du ferrocyanure ferrique, un complexe de couleur bleue, avec une absorbance maximale à 700 nm.

III.3.5. Méthode du FOX

Le test FOX a été développé à l'origine pour déterminer les niveaux d'hydroperoxydes lipidiques dans les systèmes biologiques tels que les tissus végétaux. L'ion ferreux a été oxydé pour former un ion ferrique, qui a ensuite été traité avec xylénol orange (XO) pour donner un complexe ferrique-XO (couleur bleu-violet) (**Figure 9**). Ce complexe a montré une forte absorption UV à 550 nm. La formation ou la présence d'hydroperoxydes dans un échantillon peut facilement être surveillée par un spectrophotomètre.

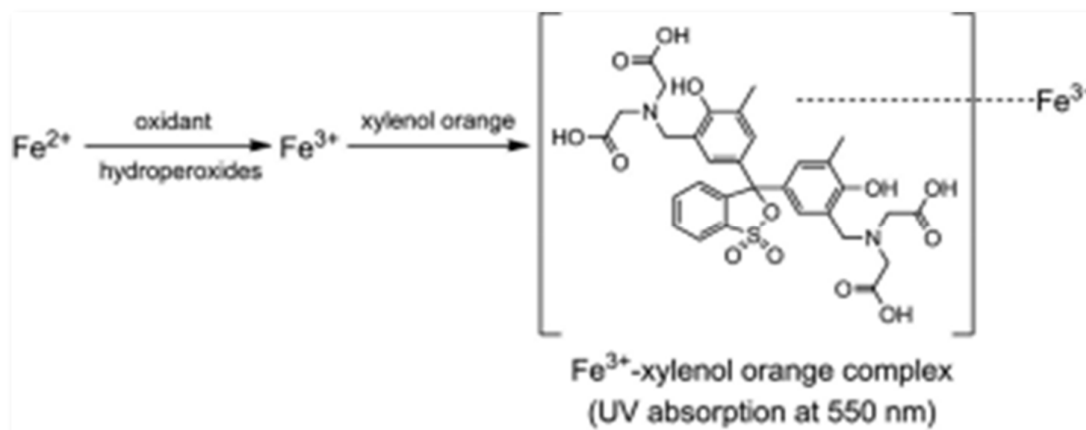


Figure 07 : Formation du complexe Fe^{3+} –xylénol orange à partir de Fe^{2+} + avec un oxydant suivi d'un traitement à l'orange xylénol.

III.3.6. Méthode du FTC

Les mécanismes associés au test FTC étaient les mêmes que pour le FOX essai. La différence était qu'un ion ferrique formé par un oxydant à partir d'un l'ion ferreux a été surveillé sous forme de complexe thiocyanate par un spectro- tomètre à 500 nm.

III.3.7. Méthode du l'ORAC

Le test ORAC mesure la capacité de piégeage des antioxydants contre radical peroxyde généré par décomposition thermique de l'AAPH à 37 °C. La fluorescéine a été utilisée comme sonde fluorescente. La perte de fluorescence de fluorescéine est une indication de l'étendue des dommages causés par sa réaction avec le radical peroxyde. L'effet protecteur d'un antioxydant était mesuré en évaluant l'aire sous la courbe de décroissance de fluorescence (AUC) par rapport à celle d'un blanc dans lequel aucun antioxydant n'était présent (*Thaipong et al., 2006*).

III.3.8. Méthode du H-ORAC

Cette technique repose sur la mesure de l'activité de chélation des métaux des antioxydants, dans les conditions de réactions de type Fenton. L'utilise un complexe Co (II) et évalue donc la capacité de protection contre la formation de radicaux hydroxyle. La fluorescéine a été incubée avec l'échantillon à analyser, puis le mélange de Fenton (généranradicaux hydroxyles) a été ajouté. La fluorescence initiale a été mesurée, après quoi les lectures ont été prises toutes les minutes après l'agitation (*Denevet al., 2014*).

III.3.9. Méthode du PIÈGE (TRAP)

La chimioluminescence (CL) améliorée par le luminol a été exploitée pour les réactions impliquant le radical peroxyde. Le signal CL a été piloté par la production de radicaux dérivés du luminol, résultant de la mal décomposition de l'AAPH. La valeur TRAP a été déterminée à partir de durée de la période pendant laquelle l'échantillon éteint le produit chimique signal de luminescence, dû à la présence d'antioxydants (*Pisoschi et Negulescu, 2011*).

III.3.10. Méthode du blanchiment de β -Carotène

Le β -carotène réagit avec le radical peroxyde pour produire du β -carotène époxydes. Par conséquent, le β -carotène a retenu l'attention en tant que radical charognard ou antioxydant (*Tsuchihashi et al., 1995*). Plus tard, un dosage antioxydant utilisant du β -carotène combiné à des lipides, comme l'acide linoléique, a été établi. Les lipides, tels que l'acide linoléique, forment un radical peroxyde ($\text{LOO}^\bullet$) en présence de ROS et d' O_2 . Ce peroxyde le radical réagit avec le β -carotène pour former un radical β -carotène stable, sous-séquentiellement, la quantité

de β -carotène diminue dans une solution d'essai. Si un antioxydant est présent dans une solution de test, il réagit de manière compétitive avec le radical peroxy. Par conséquent, les effets antioxydants sont facilement contrôlés en blanchissant la couleur d'une solution d'essai avec un spectrophotomètre à 470 nm, qui est l'absorbance typique du β -carotène.

III.3.11. Méthode du TBA

Le test TBA utilisait de l'acide 2-thiobarbiturique pour interagir avec le lipide oxydé. Produit du malonaldéhyde pour former un composé rose, avec une valeur d'absorption maximale à 532 nm. Le résultat du test était généralement exprimé comme le produit de l'absorbance à 532 nm et de l'absorbance le coefficient de malonaldéhyde, qui est communément appelé la valeur TBA (Brownley et Lachman, 1965).

III.3.12. Méthode du CAA

Le colorant fluorescent DCFH-DA (Dichlorofluoresceine-diacétate) était absorbé par les cellules cancéreuses du foie, traverse la membrane cellulaire et pénètre la cellule, et a été hydrolysée en DCFH par la lipase. D'autre part, les cellules ont été traitées avec du dichlorhydrate de 2,2'-azobis (2-amidinopropane) (ABAP), qui est capable de diffuser dans les cellules. ABAP se décompose spontanément pour former des radicaux peroxy. Les radicaux seperoxyl ont attaqué la cellule membrane pour produire plus de radicaux et oxyder le DCFH intracellulaire au DCF fluorescent. Les antioxydants peuvent empêcher l'oxydation du DCFH et les lipides membranaires et réduisent la formation de DCF. La capacité antioxydante des antioxydants peut être reflétée par le degré de fluorescence réduite. La norme couramment utilisée dans cette méthode est la quercétine, et les résultats expérimentaux peuvent être exprimés.

III.4 Activités antioxydante des espèces de genre *Thymus*

Il est bien connu que la capacité antioxydante des extraits végétaux est étroitement associée avec des composants phénoliques, qui pourraient interagir avec les radicaux libres par voie électronique ou hydrogène, ce tableau montre les résultats obtenus des expériences précédentes faites sur les espèces de *Thymus* (Tableau 06).

Tableau 06 : Résultats obtenus des expériences précédentes faites sur les espèces de *Thymus*

Espèces de <i>Thymus</i>	Huile essentielle /extrait	Méthode utilisée	Concentration	Références
<i>Thymus zygis</i>	Extrait	DPPH	12,65 ± 2,30 µg/mL	Andrea F. Afonso et al., 2018
<i>Thymus pulegioides</i>	Extrait méthanoïques	DPPH	9,50 ± 1,98 µg/mL	Andrea F. Afonso et al., 2018
<i>Thymus fragrantissimus</i>	Extrait	DPPH	2,87 ± 3,79 µg/mL	Andrea F. Afonso et al., 2018
<i>Thymus mastichina</i>	Extrait	ABTS	71,18 ± 1,05 µg/mL	Meriem Taghouti et al., 2019
<i>Thymus riatarum</i>	Extrait	DPPH	0,091 ± 0,02 mg / ml	Aouam et al., 2019
<i>Thymus ZYGIS</i>	Huile	DPPH	75,97 ± 0,86 µg/ml	Amarti et al., 2011
<i>Thymus Hirtus</i>	Extrait	DPPH	16,82 ± 0,88 µg/ml	CHOUHA et al., 2018
<i>Thymus Capitatus</i>	Huile	DPPH, FRAP et TAC	0,61, 2,13 et 0,78 µg/mL	Goudjil et al., 2020
<i>Thymus vulgaris</i>	Huile	DPPH	24,89 mg/mL	BACHIR, 2020
<i>Thymus migricus</i>	Huile	DPPH	176,8 µg/mL	Tohidi et al., 2020
<i>Thymus longicaulis subsp. longicaulis</i> var. <i>longicaulis</i>	Huile/ Extrait	le β-carotène/ acide linoléique, le DPPH	27,80 / 19,38 µg/mL	Sarikurkcu et al., 2010
<i>Thymus caramanicus</i>	Huile/ Extrait	le β-carotène/ acide linoléique, le DPPH	43,0 µg/mL ± 19,7 µg/mL	Safaei-Ghomiet al., 2010
<i>thymus mastichina L.</i>	Extrait méthanoïques/ Huile	DPPH	78 ± 241 mg/mL 2,90 / 9,15 mg GAE/g	Delgado et al., 2014
<i>Thymus broussonetii</i>	Huile	DPPH	90 µg/mL	Hamdani et al., 2014
<i>Thymus algeriensis</i>	Huile	DPPH	1800 µg/mL	Hamdani et al., 2014
<i>Thymus satureioides</i>	Huile	DPPH	8,18 ± 0,07 µg/mL	Labiad et al., 2017
<i>Thymus daenensis</i>	Huile /Extrait	DPPH	194 ± 0,02 µg/mL	Sabahiet al., 2013

Tableau 06 (la suite) : Résultats obtenus des expériences précédentes faites sur les espèces de *Thymus*

<i>Thymus pubescens</i>	Huile	DPPH	29.67±33.38µg/mL	Nickavar et Esbati, 2012
<i>Thymus kotschyanus</i>	Extrait	DPPH	44.35±50.28µg/mL	Nickavar et Esbati, 2012
<i>Thymus membranaceus</i>	Extrait	DPPH/I'ABTS/FRAP	10 µM	Pérez Tortosa et al., 2012
<i>Thymus sipyleus</i> subsp. <i>sipyleus</i> var. <i>sipyleus</i>	Huile	le β-carotène/acide linoléique, le DPPH	50=220 ± 0.5µg/mL	Tepe et al., 2012
<i>Thymus sipyleus</i> subsp. <i>sipyleus</i> var. <i>rosulans</i>	Huile	le β-carotène/acide linoléique, le DPPH	2670 ± 0.5 µg/mL	Tepe et al., 2012
<i>Thymus praecox</i> subsp. <i>Polytrichus</i>	Extrait	DPPH	70±177 µg/mL	Pérez-Tortosa et al., 2012
<i>Thymus pulegioides</i>	Extrait	DPPH	11±15 µg/mL	Pérez-Tortosa et al., 2012
<i>Thymus serpyllum</i> subsp. <i>Serpyllum</i>	Extrait	DPPH	126±389 µg/mL	Pérez-Tortosa et al., 2012
<i>Thymus striatus</i>	Extrait	DPPH	34±80 µg/mL	Pérez-Tortosa et al., 2012

Conclusion Générale

Cette revue met en évidence la botanique, la distribution, la phytochimie et la pharmacologie du Thym (*Thymus*). Cette plante, présente dans la région Algérienne et Africaine, est historiquement connue des habitants de cette région à travers différents usages notamment en médecine traditionnelle. Les usages médicaux sont principalement connus et pratiqués à travers les différentes parties et préparations utilisées contre plusieurs maladies comme le diabète et l'hypertension, comme vermifuge et stomachique.

La composition chimique de *Thymus* comprend plusieurs groupes tels que les terpénoïdes aromatiques, de flavonoïdes et d'acides phénoliques. Le thymol et le carvacrol sont les principaux composés phénoliques de l'huile de thym.

Les principaux composés non phénoliques sont le linalol et le p-cymène, carvacrol, du thymol, du gamma-terpinène, du p-cymène et du bornéol, qui sont responsables de plusieurs effets biologiques tels qu'antioxydant.

Enfin, il est à noter que ce genre mérite plus d'attention sur les plans ethnobotanique, phytochimique et pharmacologique, en raison du faible nombre d'études publiées enregistrées. D'autre part, sa conservation dans la nature devrait également être renforcée.

Références bibliographiques

- BACHIR, N.** Contribution à l'étude des propriétés des huiles essentielles extraites à partir des plantes médicinales utilisées contre l'anémie.
- Belmalha S., El Idrissi M., Amechrouq A. and Echchgadda G. (2015).** Chemical characterization of some species of Moroccan middle atlas Thyme (Region of Midelt). *Global Journal Pure and Applied Chemistry Research*, 3, 43-52.
- Benchabane O., Hazzit M., Baaliouamer A. and Mouhouche F. (2012).** Analysis and Antioxidant Activity of the Essential Oils of *Ferula vesceritensis* Coss. et Dur. and *Thymus munbyanus* Desf. *Journal of Essential Oil-Bearing Plants*, 15, 774-781.
- Bendif, H., Adouni, K., Miara, M. D., Baranauskienė, R., Kraujalis, P., Venskutonis, P. R., ... & Maggi, F. (2018).** Essential oils (EOs), pressurized liquid extracts (PLE) and carbon dioxide supercritical fluid extracts (SFE-CO₂) from Algerian *Thymus munbyanus* as valuable sources of antioxidants to be used on an industrial level. *Food chemistry*, 260, 289-298.
- Bousmaha-Marroki L., Atik-Bekkara F., Tomi F. and Joseph C. (2007).** Chemical composition and antibacterial activity of the essential oil of *Thymus ciliatus* (Desf.) Benth. ssp. *eu-ciliatus* Maire from Algeria, *Journal of Essential Oil Research*, 19, 490-493.
- Bruneton J. (1999).** Pharmacognosie, phytochimie, plantes médicinales. 3^{ème} Ed. Paris: Tec & Doc Lavoisier, P. 207-211.
- Cronquist A. (1988).** The evolution and classification of flowering plants, The New York Botanical Garden, NY, USA; 2nd Ed.
- Delgado, T., Marinero, P., Manzanera, M. C. A. S., Asensio, C., Herrero, B., Pereira, J. A., & Ramalhosa, E. (2014).** Antioxidant activity of twenty wild Spanish *Thymus mastichina* L. populations and its relation with their chemical composition. *LWT-Food Science and Technology*, 57(1), 412-418.
- Grunwald J. and Christof J.M. (2004).** Guide de la phytothérapie. La thérapeutique par les plantes. La santé par les plantes. Un répertoire des plantes. Des conseils pratiques. 1^{ère} édition. Marabout: Italie. PP 360-361.
- Hamdani, I., Bouyanzer, A., Hammouti, B., Majidi, L., Costa, J., Paolini, J., & Chetouani, A. (2014).** Chemical composition and antioxidant activity of essential oils of *Thymus broussonetii* Boiss. and *Thymus algeriensis* Boiss. from Morocco. *Asian Pacific Journal of Tropical Disease*, 4(4), 281-286.
- Hazzit M., Baaliouamer A., Faleiro M.L. and Miguel M.G. (2006).** Composition of the essential oils of *Thymus* and *Origanum* species from Algeria and their antioxidant and antimicrobial activities. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54, 6314-6321.

- Hennebelle T. (2006). Investigation chimique, chimiotaxonomique et pharmacologique de lamiales productrices d'antioxydants : *Marrubium peregrinum*, *Ballota larendana*, *Ballota pseudodictamnus* (Lamiacées) et *Lippia alba* (Verbenacées). These de Doctorat Université des sciences et technologies de lille 1, lille, Pp 304.
- Kabouche Z., Boutaghane N., Laggoune S., Kabouche A., Ait-Kaki Z.B. and Benlabed K. (2005). Comparative antibacterial activity of five Lamiaceae essential oils from Algeria. *International journal of aromatherapy*, 15, 129-133.
- Labiad, M. H., Harhar, H., Ghanimi, A., & Tabyaoui, M. (2017). Phytochemical screening and antioxidant activity of Moroccan thymus satureioides extracts. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 8(6), 2132-2139.
- Miara M.D., AitHammou M. and HadjadjAoul S. (2013). Phytothérapie et taxonomie des plantes médicinales spontanées dans la région de Tiaret (Algérie). *Phytothérapie*, 11, 206-218.
- Naghibi F., Mosaddegh M., Motamed S-M. and Ghorbani A. (2005). Labiatae Family in folk Medicine in Iran: from Ethnobotany to Pharmacology. *Iranian Journal of Pharmaceutical Research*, 2, 63-79.
- Nickavar, B., & Esbati, N. (2012). Evaluation of the antioxidant capacity and phenolic content of three *Thymus* species. *Journal of Acupuncture and Meridian Studies*, 5(3), 119-125.
- Pérez-Tortosa, V., López-Orenes, A., Martínez-Pérez, A., Ferrer, M. A., & Calderón, A. A. (2012). Antioxidant activity and rosmarinic acid changes in salicylic acid-treated *Thymus membranaceus* shoots. *Food chemistry*, 130(2), 362-369.
- Pérez-Tortosa, V., López-Orenes, A., Martínez-Pérez, A., Ferrer, M. A., & Calderón, A. A. (2012). Antioxidant activity and rosmarinic acid changes in salicylic acid-treated *Thymus membranaceus* shoots. *Food chemistry*, 130(2), 362-369.
- Quezel P., Santa S. (1962-1963). Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales, Vol. 1-2. Ed. Centre National de la Recherche Scientifique CNRS. Paris, 1170 p.
- Sabahi, Z., Zarshenas, M. M., Farmani, F., Faridi, P., Moein, S., & Moein, M. (2013). Essential oil composition and in vitro antioxidant activity of ethanolic extract of *Thymus daenensis* Celak from Iran. *Global Journal of Pharmacology*.
- Safaei-Ghomi, J., Ebrahimabadi, A. H., Djafari-Bidgoli, Z., & Batooli, H. (2009). GC/MS analysis and in vitro antioxidant activity of essential oil and methanol extracts of *Thymus caramanicus* Jalas and its main constituent carvacrol. *Food Chemistry*, 115(4), 1524-1528.
- Sarikurkcü, C., Ozer, M. S., Eskici, M., Tepe, B., Can, Ş., & Mete, E. (2010). Essential oil composition and antioxidant activity of *Thymus longicaulis* C. Presl subsp. *longicaulis* var. *longicaulis*. *Food and Chemical Toxicology*, 48(7), 1801-1805.
- Tefiani, C., Riazi, A., Youcefi, F., Aazza, S., Gago, C., Faleiro, M.L., et al. (2015). *Ammoidespusilla* (Apiaceae) and *Thymus munbyanus* (Lamiaceae) from Algeria Essential

- Oils: chemical composition, antimicrobial, antioxidant and antiproliferative activities. *Journal of Essential Oil Research*, 27 (2), 131-139.
- 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.
- Thierrey M. (2005). Guide de la flore méditerranéenne de Collioure à Menton. Arrière-pays et littoral. Editions-Sud-ouest: France. P16.
- Tohidi, B., Rahimmalek, M., Arzani, A., & Sabzaljan, M. R. (2020). Thymol, carvacrol, and antioxidant accumulation in *Thymus* species in response to different light spectra emitted by light-emitting diodes. *Food chemistry*, 307, 125521.