الجمـــهوريـة الجزائـــريـة الديمقراطية الشعبيـــة

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement
Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 20 Août 1955 - SKIKDA -
Faculté des Sciences
Dpartement D' Agronomie
Réf : / D S AGRO/2026

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة 20 أوت 1955- سكيكدة
كلية العلـوم
قسم علوم الفلاحة
رقم : / ق ع ف / 2026

Skikda le : .....

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

Je soussignée : **OUDJANE Faiza** Présidente de Jury

Certifie que L'étudiante : **CHALABI Rihab**

Spécialité : **Systèmes De Production Agroécologique**

Intitulé : **Influence du stress hydrique sur la composition phytochimique et la biosynthèse des métabolites bioactifs chez les plantes médicinales (Cas de *Lavandula angustifolia* L. et *Rosmarinus officinalis*).**

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.

Directrice de mémoire	Présidente de Jury
Sayed	

Scanned with CamScanner

الجمـــهوريـة الجزائـــريـة الديمقراطية الشعبيـــة
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement
Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 20 Août 1955 - SKIKDA -
Faculté des Sciences
Dpartement D' Agronomie
Réf : / D S AGRO/2026

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة 20 أوت 1955- سكيكدة
كلية العلـوم
قسم علوم الفلاحة
رقم : / ق ع ف / 2026

Skikda le : .....

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

Je soussignée : **OUDJANE Faiza** Présidente de Jury

Certifie que L'étudiante : **BENNOUIKES Imane**

Spécialité : **Systèmes De Production Agroécologique**

Intitulé : **Influence du stress hydrique sur la composition phytochimique et la biosynthèse des métabolites bioactifs chez les plantes médicinales (Cas de *Lavandula angustifolia* L. et *Rosmarinus officinalis*).**

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.

Directrice de mémoire	Présidente de Jury
Sayed	

Scanned with CamScanner

الجمـــهوريـة الجزائـــريـة الديمقراطية الشعبيـــة

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement
Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 20 Août 1955 - SKIKDA -
Faculté des Sciences
Dpartement D' Agronomie
Réf : / D S AGRO/2026

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة 20 أوت 1955- سكيكدة
كلية العلـوم
قسم علوم الفلاحة
رقم : / ق ع ف/ 2026

Skikda le : .....

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

Je soussignée : **OUDJANE Faiza** Présidente de Jury

Certifie que L'étudiante : **BOUATROUS Ranya**

Spécialité : **Systèmes De Production Agroécologique**

Intitulé : **Influence du stress hydrique sur la composition phytochimique et la biosynthèse des métabolites bioactifs chez les plantes médicinales (Cas de *Lavandula angustifolia* L. et *Rosmarinus officinalis*).**

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.

Directrice de mémoire	Présidente de Jury
Sayed	

Scanned with CamScanner

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة 20 أوت 1955 - سكيكدة -

Université 20 Août 1955-Skikda 1955



Faculté des science

Département des Sciences agronomiques

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Filière : Sciences agronomiques

Option: Système de production agro écologique

Intitulé :

Impact du stress hydrique sur la composition phytochimique et la biosynthèse des métabolites bioactifs chez certaines plantes médicinales cultivées dans la région de Skikda (Nord-Est algérien).

Présenté par :

Bouatrous Ranya

Chalabi Riheb

Bennouikes Imane

Membre de Jury:

Dr. Souilah Nabila	Présidente	MCA. Univ. 20 août 1955- Skikda
Dr. Sayed Ibtissem	Promotrice	MCB. Univ. 20 août 1955- Skikda
Dr. Oudjane Faiza	Examinateur	MCB. Univ. 20 août 1955- Skikda

Année universitaire 2025 /2026

Remerciement

Avant tout, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers ALLAH le Tout- Puissant, qui nous a accordé la santé, la volonté et le courage nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à adresser nos remerciements les plus sincères et notre profonde reconnaissance à notre encadrante, Mme SAYED Ibtissem, Maître de conférences au Département d'Agronomie de l'Université 20 Août 1955 de Skikda. Nous la remercions chaleureusement pour la confiance qu'elle nous a accordée, pour sa disponibilité constante, ainsi que pour ses précieux conseils et ses orientations avisées tout au long de la réalisation de ce projet.

Nous honorés de témoigner notre vive gratitude à Mme SOUILAH Nabila, qui a accepté de nous faire l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

Nos sincères remerciements s'adressent également à Mr HAFSI Zakaria, Maître de conférences au Département d'Agronomie de l'Université de Skikda, pour l'intérêt qu'il a porté à notre travail en acceptant de l'examiner et d'en évaluer les résultats.

Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude affectueuse à nos familles, à nos parents pour leur soutien indéfectible, leur patience et leurs sacrifices, ainsi qu'à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'accomplissement de ce parcours universitaire.



2026

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail, fruit d'années de persévérance,

A mes parents, dont la grandeur ne se mesure ni aux mots ni au temps, et à qui je dois bien plus que ce que cette page pourrait exprimer.

A ceux qui ont donné un sens aux moments de doute et une valeur aux instants de réussite.

A ma famille, à mes amis et à toutes les personnes dont la présence discrète a laissé une empreinte précieuse sur ce parcours.

Enfin, à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à faire de ce rêve une réalité.

Bouatrous Ranya



2026

Dédicaces

Avant tout, je rends grâce à dieu le tout-puissant pour sa bénédiction, sa grâce et de m'avoir donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

A mes chers parents,

A mon cher père, le pilier de ma vie, mon plus grand modèle de patience et de sacrifice. A toi qui as tout donné pour éclairer mon chemin, merci pour ton Amour inconditionnel, ta foi inébranlable et tes prières. Et à celle qui est partie mais reste toujours présente, à ma tendre mère, dont l'amour, la tendresse et les sacrifices continueront d'éclairer mon chemin et de vivre à jamais dans mon cœur. Que ce travail soit le reflet de votre fierté.

A ma chère sœur,

Pour sa complicité unique, son affection et son soutien précieux à chaque instant de ma vie.

A la petite ayla,

Notre douce étoile et le plus pur sourire qui illumine notre maison.

A mes chères binômes,

Mes amies et fidèles compagnes de route, pour notre belle collaboration, notre persévérance partagée et tous les moments inoubliables vécus ensemble durant ce parcours.

A toute ma famille et à mes précieux amis,

Pour leur présence, leur affection et leurs encouragements Constants.

Bennouikes Imane



2026

Dédicaces

À ALLAH le Tout-Puissant...

Qui m'a guidée, armée de patience et donné la force d'accomplir ce travail.

À moi-même...

Pour avoir persévéré, cru en mes rêves et surmonté chaque défi avec courage.

À mes précieux parents...

Mon tendre père, ma chère mère, et ma source de force, mon cher père. Ce travail est le fruit de vos sacrifices et de vos prières.

À mes frères et soutiens, Mohamed et Amine...

Pour votre présence constante, votre aide et vos encouragements au quotidien.

À mes chères amies...

Mes compagnes de route, pour votre soutien infaillible et votre belle énergie.

À mes coéquipières, Rania et Imane...

Sans oublier celles avec qui j'ai partagé les moindres détails de ce travail, et qui ont été à mes côtés dans le combat du laboratoire et la fatigue, étape par étape, jusqu'à ce jour.

Chalabi Riheb

Table de matières

CONTENU	PAGE
Remerciements	//
Dédicaces (BOUATROUS)	//
Liste des abréviations	//
Liste des figures	//
Liste des tableaux	//
Résumé	//
Introduction générale	01
Chapitre I : Le stress hydrique chez les plantes	
I.1. Notion et définition du stress hydrique	05
I.2. Types de stress hydrique	06
I.2.1. Stress léger	06
I.2.2. Stress modéré	06
I.2.3. Stress sévère	06
I.3. Causes du stress hydrique	07
I.3.1. Facteurs climatiques	07
I.3.2. Propriétés du sol	07
I.3.3. Pratiques agricoles	08
I.4. Effets physiologiques du stress hydrique	08
I.4.1. Impact sur la photosynthèse	08

I.4.2. Les phases de diminution de la photosynthèse	08
I.4.3. Impact sur l'équilibre hydrique de la plante	08
I.4.4. Impact sur la croissance et le développement	08
I.5. Effets biochimiques du stress hydrique	10
I.5.1. Stress oxydatif	10
I.5.2. Mécanismes de défense de la plante	11
I.5.3. Production de composés phénoliques	11
I.6. Mécanismes d'adaptation des plantes au stress hydrique	11
I.6.1. Adaptations morphologiques	11
I.6.2. Adaptations physiologiques	12
I.6.3. Adaptations moléculaires et biochimiques	12
Chapitre II : Plantes médicinales et métabolites secondaires	
II.1. Définition des plantes médicinales et aromatiques	14
II.2. Importance thérapeutique et économique des plantes médicinales	15
II.2.1. Importance thérapeutique	15
II.2.2. Perspectives économiques et marché	15
II.3. Classification des métabolites secondaires	16
II.3.1. Les composés phénoliques	16
II.3.2. Les alcaloïdes	17
II.3.3. Les composés terpéniques	17
II.4. Les composés phytochimiques	18

II.4.1. Les polyphénols	18
II.4.2. Les flavonoïdes	19
II.4.3. Les terpènes	19
II.4.4. Les huiles essentielles	20
II.5. Biosynthèse des métabolites secondaires	21
II.5.1. Historique	21
II.5.2. Voie du shikimate	21
II.5.3. Voie du mévalonate	22
II.5.4. Influence des facteurs environnementaux sur la biosynthèse	23
II.6. Effet du stress hydrique sur la composition phytochimique	24
II.6.1. Variation de la concentration des métabolites secondaires	24
II.6.2. Relation entre le stress hydrique et la production des huiles essentielles	24
Chapitre III : Étude des plantes sélectionnées	
III.1. Classification et diversité botanique (*Lavandula* sp.)	27
III.2. Description morphologique générale (*Lavandula* sp.)	28
III.3. Distribution géographique et habitat (*Lavandula* sp.)	31
III.4. Composition chimique (*Lavandula* sp.)	32
III.5. Utilisations médicales de *Lavandula*	34
III.6. Effet du stress hydrique sur le genre *Lavandula*	35
III.3.2. Le romarin (*Rosmarinus officinalis* L.)	37

III.3.2.1. Classification de *Rosmarinus officinalis* L.	37
III.3.2.2. Description morphologique	38
III.3.2.3. Répartition géographique du romarin	39
III.3.2.4. Composition chimique de *Rosmarinus officinalis*	40
III.3.2.5. Usages et propriétés médicinales du romarin	40
III.3.2.6. Effet du stress hydrique sur *Rosmarinus officinalis*	40
III. 3.2.6.1. Effets morphologiques	40
III.3.2.6.2. Effets biochimiques (métaboliques)	41
III.3.2.6.3. Effets anatomiques et cellulaires	41
III.3.3 Importance des plantes médicinales en Algérie	41
III.3.1. 1.Conditions climatiques	42
III.3.2. 1.Adaptation de la région à la culture des plantes aromatiques	42
Chapitre IV : Matériel et méthodes	
IV.1. Présentation du matériel végétal	45
IV.2. Mise en place de l'expérimentation	46
IV.2.1. Matériel végétal	46
IV.2.2. Répartition des plants expérimentaux	47
IV.2.3. Application du stress hydrique	47
IV.2.4. Récolte et préparation du matériel végétal	47
IV.3. Réactifs chimiques	49
IV.4. Matériel et appareillage de laboratoire	49

IV.5. Méthodes d’analyse	49
IV.5.1. Méthodes d’étude	49
IV.5.2. Détermination de la teneur en chlorophylles	50
IV.5.3. Extraction des huiles essentielles (HE)	51
IV.5.4. Préparation des extraits éthanoïques	52
IV.5.5. Calcul du rendement en composés phénoliques de l'extrait éthanolique	52
IV.5.6. Dosage des composés phénoliques totaux	53
IV.5.7. Dosage des flavonoïdes totaux	53
IV.5.8. Dosage des tanins	53
Chapitre V : Résultats et discussion	
V.1. Effet du stress hydrique sur la teneur en chlorophylle totale	55
V.2. Effet du stress hydrique sur la production des huiles essentielles	57
V.3. Composés phénoliques	59
V.3.1. Calcul du rendement d'extraction	59
V.3.2. Détermination des polyphénols totaux	60
V.3.3. Détermination des flavonoïdes	61
V.3.4. Détermination des tanins	61
Conclusion générale	64
Références bibliographiques	68

Liste des abréviations

ABA : Acide Abscissique

$AlCl_3$: Chlorure d'aluminium

ATP : Adénosine Triphosphate

CAT : Catalase

CO_2 : Dioxyde de carbone

DMADP : Diméthylallyl diphosphate

DREB : Dehydration-Responsive Element Binding protein

EAG : Équivalent Acide Gallique

EC : Équivalent Catéchine

EQ : Équivalent Quercétine

ES : Extrait Sec

$FeCl_3$: Chlorure ferrique

HCl : Acide chlorhydrique

HE : Huiles Essentielles

HMG-CoA : Hydroxyméthylglutaryl-CoA

IPP : Isopenténylе diphosphate

LHCII : Light-Harvesting Complex II (Complexe collecteur de lumière)

MEP : Méthylérythritol phosphate

MVA : Mévalonate

$NADP^+$: Nicotinamide Adénine Dinucléotide Phosphate

PAL : Phénylalanine Ammonia-Lyase

POD : Peroxydase

ROS : Reactive Oxygen Species (Espèces Réactives de l'Oxygène)

SOD : Superoxyde dismutase

TPS : Terpène synthase

UV : Ultraviolet

Liste des figures

N°	Titre de la figure	Page
Figure II.1	Structure chimique d'un composé phénolique	17
Figure II.2	Structure générale des alcaloïdes	17
Figure II.3	Structure de l'isoprène	18
Figure II.4	Structure de base des flavonoïdes	19
Figure II.5	La voie du shikimate	22
Figure II.6	La voie du mévalonate	23
Figure III.1	Aspect général de *Lavandula* sp	28
Figure III.2	Exemples illustrant la diversité des formes de bractées chez le genre *Lavandula*	29
Figure III.3	Variation de la morphologie de la corolle au sein du genre *Lavandula*	30
Figure III.4	Exemples de variation des calices au sein du genre *Lavandula*, illustrant les différences entre les lobes du calice	31
Figure III.5	Répartition mondiale des principales espèces du genre *Lavandula*	32
Figure III.6	Mécanisme d'action de *Lavandula* sp. avec mise en évidence de ses effets pharmacologiques	35
Figure III.7	Morphologie de *Rosmarinus officinalis* L	37
Figure III.8	Planche botanique de *Rosmarinus officinalis*	38
Figure III.9	Répartition de *Rosmarinus officinalis* L.	39

Figure IV.1	Romarin (Photo personnelle).	45
Figure IV.2	Lavande (Photo personnelle).	46
Figure IV.3	Récolte, lavage et séchage du matériel végétal (Photos personnelles).	48
Figure IV.4	Séchage des feuilles de *Rosmarinus officinalis* et de *Lavandula* sp. (Photos personnelles).	48
Figure IV.5	Étapes de détermination de la teneur en chlorophylles (Photos personnelles).	50
Figure IV.6	Montage d'extraction des huiles essentielles par hydrodistillation de type Clevenger (Photos personnelles).	51
Figure IV.7	Dispositif d'évaporation du solvant à l'aide d'un évaporateur rotatif (Photos personnelles).	52
Figure V.1	Influence du stress hydrique sur la teneur en chlorophylle totale chez le romarin (*Rosmarinus officinalis*) et la lavande (*Lavandula* sp.).	55
Figure V.2	Aspect de la couche d'huile essentielle de romarin et de lavande obtenue sous différents niveaux d'irrigation (50 %, 25 % et 100 %) (Photos personnelles).	57
Figure V.3	Courbe d'étalonnage à l'acide gallique pour le dosage des polyphénols totaux et variations des teneurs en fonction du stress hydrique.	40
Figure V.4	Courbe d'étalonnage à la quercétine pour le dosage des flavonoïdes totaux et cinétique d'accumulation sous stress hydrique.	61
Figure V.5	Courbe d'étalonnage à la catéchine pour le dosage des tanins condensés et profils comparatifs interspécifiques sous	62

	contrainte hydrique.	

Liste des tableaux

N°	Titre du tableau	Page
Tableau II.1	Classification morphologique des plantes médicinales et aromatiques selon l'organe utilisé	14
Tableau III.1	Classification taxonomique du genre *Lavandula* selon le système APG	28
Tableau III.2	Principaux constituants chimiques des huiles essentielles (% du volume total) chez différentes espèces de *Lavandula*	33
Tableau III.3	Classification phylogénétique du romarin (*Rosmarinus officinalis* L.) selon le système APG	37
Tableau IV.1	Répartition des plants selon les traitements hydriques.	47
Tableau V.1	Rendement de l'extraction hydroéthanolique (%) des feuilles de *Rosmarinus officinalis* et de *Lavandula* sp.	59

Résume

Résumé

Titre : Impact du stress hydrique sur la composition phytochimique et la biosynthèse des métabolites bioactifs chez certaines plantes médicinales cultivées dans la région de Skikda (Nord-Est algérien).

Ce mémoire étudie l'effet des contraintes hydriques sur la physiologie et la composition phytochimique de deux plantes de la famille des Lamiacées : le romarin (Rosmarinus sp.) et la lavande (Lavandula sp.). À travers une expérimentation sous serre contrôlée à l'Université de Skikda, trois régimes d'irrigation (100 %, 50 % et 25 % de la capacité au champ) ont été appliqués.

Les résultats démontrent qu'un stress hydrique sévère (25 %) agit comme un puissant éliciteur, stimulant de manière maximale la biosynthèse des huiles essentielles et des composés physioliques, tandis qu'un stress modéré (50 %) montre des effets plus nuancés sur le métabolisme secondaire. Le romarin a manifesté une meilleure résilience phénologique que la lavande.

Cette étude conclut que l'irrigation déficitaire contrôlée est une stratégie agronomique prometteuse pour optimiser la qualité thérapeutique des plantes médicinales dans les régions arides.

Mots-clés : Stress hydrique | Plantes médicinales | Métabolites secondaires | Composition phytochimique | Biosynthèse | Huiles essentielles | Composés phénoliques |Résilience physiologique | Région de Skikda

Résume

ملخص (العربية)

عنـوان البحـث: تـأثير الإجهـاد المـائي علـى التركيـب الكيميـائي النبـاتي والتخليـق الحيـوي للمسـتقلبات النشـطة بيولوجيًا في بعض النباتات الطبية المزروعة في منطقة سكيكدة (شمال شرق الجزائر).

تتناول هذه الأطروحة تأثير الإجهاد المائي على الخصائص الفسيولوجيا والتركيب الكميائي النباتي لنباتين من الفصيلة الشفوية (Lamiaceae) وهما إكليل الجبل (Rosmarinus sp.) والخزامى (Lavandula sp.). وقد

أجريت تجربة داخل بيت دفيئة مراقب بجامعة سكيكدة، طُبقت ثلاثة أنظمة ري (100%، 50%، و25% من السعة الحقلية).

أظهرت النتائج أن الإجهاد المائي الشديد (25%) يعمل كمحفز قوي، إذ يحفز إلى أقصى حد التخليق الحيوي للزيوت الأساسية والمركبات الفينولية، في حين يظهر الإجهاد المائي المعتدل (50%) تأثيرات أكثر تدرجا على الأيض الثانوي. كما أظهر إكليل الجبل قدرة أفضل على التحمل الفسيولوجي مقارنة بالخزامى.

وتخلص هذه الدراسة إلى أن الريّ الناقص المُتحكّم فيه يمثل استراتيجية زراعية واعدة لتحسين الجودة العلاجية للنباتات الطبية في المناطق القاحلة.

الكلمات المفتاحية: الإجهاد المائي | النباتات الطبية | المستقلبات الثانوية | التركيب الكيميائي النباتي | التخليق الحيوي | الزيوت العطرية | المركبات الفينولية | التحمل الفسيولوجي | منطقة سكيكدة

|

Résume

Abstract

Title: Impact of water stress on the phytochemical composition and biosynthesis of bioactive metabolites in certain medicinal plants grown in the Skikda region (Northeastern Algeria).

This dissertation investigates the effect of water stress on the physiology and phytochemical composition of two plants belonging to the Lamiaceae family: rosemary (Rosmarinus sp.) and lavender (Lavandula sp.). A controlled greenhouse experiment was conducted at the University of Skikda, where three irrigation regimes (100%, 50%, and 25% of field capacity) were applied.

The results show that severe water stress (25%) acts as a powerful elicitor, maximally stimulating the biosynthesis of essential oils and phenolic compounds, whereas moderate water stress (50%) shows more nuanced effects on secondary metabolism. Rosemary exhibited greater physiological resilience than lavender.

This study concludes that controlled deficit irrigation is a promising agronomic strategy for optimizing the therapeutic quality of medicinal plants in arid regions.

Keywords: Water stress; Medicinal plants; Secondary metabolites; Phytochemical composition; Biosynthesis; Essential oils; Phenolic compounds; Physiological resilience; Skikda region

Introduction générale

Introduction générale

Depuis l'Antiquité, l'Homme recourt aux plantes pour se soigner. Les remèdes d'origine végétale étant souvent perçus comme moins toxiques et plus sûrs que les molécules pharmaceutiques de synthèse, les industries du secteur manifestent un intérêt croissant pour les études ethnobotaniques ciblant les plantes médicinales **(Farnsworth et al., 1986).** À partir du XVIIIe siècle, cet intérêt empirique a évolué vers une démarche scientifique rigoureuse, orientant la recherche vers l'isolement et l'extraction des principes actifs. Dès lors, les propriétés thérapeutiques de ces végétaux ont été formellement attribuées à leurs métabolites secondaires **(Iserin, 2001).** L'importance de cette approche est corroborée par l'Organisation mondiale de la santé, qui estime qu'environ 80 % de la population mondiale, soit plus de quatre milliards d'individus, dépendent principalement de la médecine traditionnelle pour leurs soins de santé primaires. Il est ainsi hautement probable qu'une part prépondérante de ces traitements repose sur l'utilisation d'extraits végétaux ou de substances actives naturelles **(Dibong et al., 2011).**

Au sein de cette vaste diversité floristique, le bassin méditerranéen s'impose comme un biotope particulièrement propice au développement des plantes médicinales les plus étudiées et exploitées. Parmi celles-ci figure le romarin **(Rosmarinus officinalis L.),** une espèce de la famille des Lamiacées (Lamiaceae), réputée pour sa large gamme de propriétés pharmacologiques majeures, incluant des effets antidiabétiques, antimicrobiens, antiinflammatoires, antioxydants et antidépresseurs. Cette activité biologique remarquable est intrinsèquement liée à sa richesse en composés chimiques bioactifs **(Gazwi et al., 2020).** Dans cette même lignée taxonomique, les espèces du genre Lavandula (Lavandula spp.), également rattachées aux Lamiacées, sont employées depuis des siècles, sous forme séchée ou d'huile essentielle, à des fins thérapeutiques et cosmétiques. Cette huile est traditionnellement valorisée pour ses propriétés antibactériennes, antifongiques, sédatives et antidépressives, de même que pour son action myorelaxante sur les muscles lisses et son efficacité dans le traitement des brûlures et des piqûres d'insectes **(Cavanagh & Wilkinson, 2002)**.

Cependant, ces systèmes végétaux à haute valeur ajoutée sont aujourd'hui confrontés à des défis environnementaux critiques. Depuis le début du XXIe siècle, la hausse continue des températures mondiales et les projections climatiques désignent l'Algérie comme l'un des pays les plus vulnérables aux changements climatiques, un phénomène qui se traduit par une baisse drastique des précipitations et un réchauffement thermique sévère. Ces

bouleversements altèrent profondément le secteur agricole, provoquant un faible renouvellement du couvert végétal, une chute significative des rendements, une accélération de la dégradation des sols et une aggravation de la pénurie de terres arables **(Bakhtache & Hadjene, 2023)**.

La criticité du stress hydrique réside dans les perturbations profondes qu'il engendre sur les processus physiologiques et métaboliques de la plante. Ce déficit affecte directement l'équilibre hormonal en stimulant la biosynthèse d'acide abscissique (ABA), couramment qualifié d'« hormone du stress ». Il s'ensuit une inhibition de la photosynthèse, un ralentissement de l'expansion foliaire et une déperdition hydrique accrue à l'échelle cellulaire. Cet état de stress persistant altère durablement les performances agronomiques, la vitalité de la plante et sa capacité à synthétiser ses composés bioactifs **(Kara & Brinis, 2012)**.

Pour faire face au déficit hydrique, les plantes déploient divers mécanismes d'adaptation visant à en atténuer les effets délétères. L'une des principales réponses est l'activation du système de défense antioxydant, crucial pour la neutralisation des espèces réactives de l'oxygène (ROS) générées par la sécheresse, assurant ainsi la protection des membranes cellulaires et de l'appareil **photosynthétique (Farooq et al., 2009 ; Albergaria et al., 2020)**. Par ailleurs, le stress hydrique module la synthèse des composés phénoliques et des flavonoïdes, dont l'accumulation peut fluctuer selon l'espèce, l'intensité et la durée de la contrainte. Ces métabolites renforcent les capacités de défense et d'acclimatation des végétaux face aux conditions **hostiles (Albergaria et al., 2020)**. En réaction au manque d'eau, des signaux chimiques transmis du système racinaire vers les organes aériens stimulent également la biosynthèse de métabolites secondaires, permettant à la plante d'ajuster son métabolisme pour accroître sa tolérance **(Albergaria et al., 2020)**. De surcroît, la sécheresse induit l'accumulation de composés osmoprotecteurs, tels que la proline, certains acides organiques et polyols, qui participent au maintien de l'homéostasie **cellulaire (Farooq et al., 2009)**. Enfin, le stress hydrique peut altérer le rendement et le profil chimique des huiles essentielles chez plusieurs plantes médicinales et aromatiques, dont les espèces du genre Lavandula **(Shabankareh et al., 2021)**.

Les plantes médicinales manifestent une plasticité remarquable face aux conditions environnementales adverses grâce à l'orchestration de mécanismes physiologiques, biochimiques et moléculaires assurant leur maintien et leur croissance sous diverses contraintes abiotiques **(Ghorbanpour et al., 2020)**. Au cœur de ces mécanismes, la

biosynthèse de métabolites bioactifs constitue un levier majeur de tolérance. L'exposition aux stress abiotiques déclenchant une surproduction de ROS, les cellules végétales activent des voies de signalisation destinées à prévenir les dommages **oxydatifs (Ghorbanpour et al., 2020)**. Les remaniements biochimiques consécutifs modifient le profil des métabolites secondaires et, par extension, les propriétés pharmacologiques des plantes, induisant des effets potentiellement synergiques ou antagonistes selon la nature et la sévérité du stress **(Sharma, 2024)**. Particulièrement bien adaptées aux environnements semi-arides, les plantes aromatiques ajustent finement leur métabolisme spécialisé, optimisant la synthèse de molécules bioactives pour préserver leurs fonctions physiologiques vitales et résister aux pressions environnementales.

Cette étude s'inscrit dans une démarche scientifique et socioéconomique à long terme, visant à contribuer à la valorisation des ressources phytothérapeutiques locales, et plus spécifiquement Lavandula spp. et Rosmarinus officinalis L.. L'objectif est de générer des données phytochimiques et biologiques robustes pour appuyer l'intégration de ces espèces dans des filières de production durables au sein des communautés rurales de la région de Skikda. Sur la base de cet objectif global, nos hypothèses et notre protocole expérimental s'articulent autour de l'analyse des réponses physiologiques et métaboliques de ces deux espèces soumises à différents régimes hydriques contrôlés, ainsi que de l'évaluation des altérations induites sur leur profil phytochimique et les voies de biosynthèse de leurs métabolites bioactifs.

À cette fin, l'application de plusieurs niveaux de contrainte hydrique, simulant un déficit progressif, a constitué le socle de notre dispositif expérimental. Au cours de cet essai, les teneurs en composés phénoliques totaux, en flavonoïdes et en huiles essentielles, de même que l'activité antioxydante des extraits, ont été quantifiées. Cette démarche vise in fine à déterminer le seuil de stress hydrique optimal propice à l'accumulation de métabolites à haute valeur thérapeutique chez ces deux espèces, en adéquation avec les conditions pédoclimatiques spécifiques du NordEst algérien.

Chapitre I : Le stress hydrique chez les plantes

Chapitre I : Le stress hydrique chez les plantes

Le stress hydrique constitue l'une des contraintes environnementales les plus critiques limitant la productivité végétale à l'échelle mondiale. Ce chapitre examine en profondeur la nature de ce phénomène, en distinguant ses différentes formes telles que la sécheresse et le stress osmotique. Nous analyserons ses causes multifactorielles, qu'elles soient d'ordre climatique ou liées aux propriétés édaphiques, avant d'aborder ses répercussions directes sur la physiologie et la biochimie de la plante, notamment l'altération de l'appareil photosynthétique et l'induction d'un stress oxydatif. Enfin, une attention particulière sera portée aux mécanismes d'adaptation (morphologiques, physiologiques, moléculaires et biochimiques) que les végétaux déploient pour maintenir leur homéostasie face à la pénurie d'eau.

I.1. Notion et définition du stress hydrique

La dégradation des sols et la sécheresse représentent des facteurs limitants majeurs pour le développement des plantes. Ces dernières sont fréquemment exposées à des conditions environnementales sévères induites par la diminution du potentiel hydrique, l'élévation des températures et l'augmentation de la salinité, générant ainsi diverses formes de stress. Le stress hydrique est reconnu comme l'une des contraintes abiotiques les plus délétères, impactant négativement la croissance, le développement et le rendement des végétaux. En situation de déficit hydrique, les plantes déploient un arsenal de mécanismes d'adaptation physiologiques et biochimiques visant à préserver leur équilibre hydrique interne et à optimiser leur tolérance à la sécheresse. La nature et l'efficacité de ces modifications sont intrinsèquement liées au degré de résistance de l'espèce face au stress **(Oukara et al., 2017).**

D'un point de vue physiologique, le stress hydrique s'installe lorsque la quantité d'eau disponible dans le sol devient insuffisante pour couvrir les besoins métaboliques de la plante. Il se manifeste également lorsque les pertes hydriques par évapotranspiration foliaire excèdent la capacité d'absorption radiculaire, engendrant ainsi un déséquilibre du statut hydrique du végétal **(Salehi-Lisar & Bakhshayeshan-Agdam, 2016).**

Dans ce contexte, le stress hydrique se définit comme toute contrainte environnementale entravant le fonctionnement physiologique normal de la plante **(Hopkins, 2003, cité dans Mouloudi, 2019)**. Le degré de cette perturbation est

tributaire de la nature de l'agent stressant, de son intensité et de sa durée, mais également du patrimoine génétique spécifique à chaque espèce.

Selon Girardin (1999) in (Mouloudi, 2019), le stress hydrique découle d'un déséquilibre de l'état hydrique de la plante, impactant directement son métabolisme, sa croissance et l'organogenèse. Bien que le flétrissement constitue souvent le premier symptôme macroscopique, il s'avère être un indicateur tardif, car de profondes altérations métaboliques précèdent généralement toute manifestation phénotypique. Ainsi, une évaluation rigoureuse du niveau de stress hydrique requiert la quantification de paramètres physiologiques spécifiques à l'échelle de la plante ou du sol **(Pindard, 2000, cité dans Mouloudi, 2019)**.

Pour faire face à cette contrainte, les plantes ont développé diverses stratégies adaptatives. Certaines espèces ont la capacité d'allonger leur cycle de développement ou de moduler leurs traits morphologiques et physiologiques, notamment par la réduction de la surface d'interception foliaire ou par ajustement osmotique, afin de préserver leur turgescence cellulaire **(Mujica et al., 2001; Jacobsen et al., 2003, cité dans Mouloudi, 2019**).

I.2. Types de stress hydrique

I.2.1. Stress léger

Le stress hydrique léger permet souvent d'améliorer l'efficience de l'utilisation de l'eau tout en préservant l'essentiel de l'activité métabolique. Il induit une accumulation accrue de glucides consécutive à la dégradation des sucres complexes, ainsi qu'une légère réduction de la surface foliaire et de la biomasse globale, expliquée par un ralentissement de la phyllotaxie et une abscission foliaire modérée **(Imadi et al., 2016).**

I.2.2. Stress modéré

Le stress hydrique modéré déclenche des réponses adaptatives plus prononcées, telles que la fermeture stomatique partielle visant à restreindre les déperditions hydriques. Ce phénomène s'accompagne d'un ralentissement transitoire de l'activité photosynthétique, sans toutefois causer de lésions irréversibles ; cette inhibition demeure réversible dès la réhydratation des tissus. Un processus de déshydratation tissulaire s'amorce, impactant en premier lieu le système racinaire avant d'atteindre le feuillage **(Imadi et al., 2016)**.

I.2.3. Stress sévère

Le stress hydrique sévère engendre une perturbation drastique de la translocation de l'eau et un effondrement de la conductivité hydraulique, menant à une forte

inhibition de la photosynthèse et à un arrêt de la croissance. Il provoque des dommages structurels à l'échelle cellulaire et stimule une accumulation massive de proline, un osmolyte crucial pour la survie de la plante. À ce stade, on observe une chute critique de la teneur relative en eau, un effondrement de la biomasse et une détérioration de l'efficience de l'utilisation de l'eau **(Imadi et al., 2016)**.

I.3. Causes du stress hydrique

I.3.1. Facteurs climatiques

Les variables climatiques représentent les facteurs déterminants du stress hydrique. La sécheresse édaphique s'installe généralement au cours de périodes prolongées d'aridité, provoquant un tarissement de l'humidité du sol qui impacte sévèrement les cultures agronomiques et les phytocénoses naturelles **(Petkova, Kuzmova & Berova, 2019)**.

Par ailleurs, la sécheresse atmosphérique, définie par des températures extrêmes couplées à des vents secs et chauds, exacerbe le taux d'évapotranspiration. Sous ces conditions, la demande évaporative de la plante s'accroît drastiquement alors que l'absorption racinaire se révèle insuffisante, précipitant ainsi le végétal dans un état de déficit hydrique sévère **(Petkova et al., 2019)**.

En outre, les bouleversements climatiques mondiaux, marqués par l'irrégularité des précipitations, le réchauffement global et l'augmentation de la concentration en CO_2 atmosphérique, contribuent à la récurrence et à l'intensification du stress hydrique. Ces changements restreignent considérablement la disponibilité en eau douce et s'imposent comme un défi majeur pour la sécurité alimentaire et la production agricole **(Salehi-Lisar & Bakhshayeshan-Agdam, 2016 ; Petkova et al., 2019)**.

I.3.2. Propriétés du sol

Les caractéristiques physico-chimiques du sol influencent directement la biodisponibilité de l'eau. Une forte salinité édaphique atténue le gradient osmotique à l'interface sol-racine, limitant drastiquement la capacité d'absorption hydrique, voire l'annihilant dans des conditions extrêmes **(Ahmad & Wani, 2014, pp. 82–83)**. Cette situation engendre un stress osmotique secondaire, perturbant le métabolisme et la croissance en raison de la toxicité ionique accumulée dans la rhizosphère **(Munns, 2005; Munns & Tester, 2008, as cited in Mouloudi, 2019)**.

De même, d'autres contraintes telles que l'hypothermie du sol ou l'anoxie radiculaire liée à l'engorgement (inondation) entravent le fonctionnement du système

racinaire, induisant ce que l'on qualifie de pseudo-sécheresse ou sécheresse physiologique **(Salehi-Lisar & Bakhshayeshan-Agdam, 2016)**.

I.3.3. Pratiques agricoles

Les itinéraires techniques jouent un rôle prépondérant : une gestion inadéquate de l'irrigation peut aggraver le déficit hydrique ou provoquer un lessivage et des déséquilibres structuraux du sol, compromettant l'efficacité de l'absorption racinaire. Par conséquent, une rationalisation des ressources hydriques s'avère indispensable pour atténuer l'impact agronomique du stress hydrique **(Salehi-Lisar & Bakhshayeshan-Agdam, 2016)**.

I.4. Effets physiologiques du stress hydrique

I.4.1. Impact sur la photosynthèse

Le stress hydrique induit un déséquilibre profond du métabolisme carboné végétal. À l'échelle de l'écosystème, cela se traduit par une chute de l'assimilation nette de carbone, phénomène particulièrement prégnant durant les épisodes estivaux sous climat méditerranéen. À mesure que le déficit s'aggrave, l'activité photosynthétique foliaire s'effondre, réduisant drastiquement le bilan carboné de la plante. En fin de saison sèche, l'assimilation nette peut frôler le zéro, voire devenir négative si les pertes liées à la respiration supplantent la fixation du carbone. Cette baisse d'activité est principalement régie par la fermeture stomatique, une stratégie d'évitement visant à limiter la transpiration **(Chaves et al., 2002)**.

La diminution de la teneur relative en eau affecte consécutivement les pigments chlorophylliens, amoindrissant la capacité de capture des photons. De plus, la chaîne de transport d'électrons au sein des photosystèmes subit des dysfonctionnements, freinant la synthèse d'ATP et de $NADP^+$ réduit. Ces multiples altérations aboutissent à une perte d'efficience globale et à une déstabilisation structurelle de l'appareil photosynthétique intrachloroplastique **(Rahman & Hasegawa, 2012)**.

I.4.2. Les phases de diminution de la photosynthèse

La chute de l'activité photosynthétique s'articule généralement autour de trois phases successives :

I.4.2.1. Phase stomatique

L'assimilation du CO_2 se maintient à un niveau basal grâce à l'efficacité de la machinerie biochimique, et ce, malgré la baisse de la pression partielle en CO_2 intracellulaire due à la fermeture des stomates.

I.4.2.2. Phase mixte (stomatique et non-stomatique)

L'effondrement du rendement photosynthétique est la résultante combinée de la restriction gazeuse et des premières altérations biochimiques du mésophylle.

I.4.2.3. Phase non-stomatique

On assiste à une dégradation de l'activité des enzymes clés du cycle de Calvin et de l'assimilation de l'azote, précipitant la sénescence irréversible des tissus foliaires **(Imadi et al., 2016)**.

I.4.3. Impact sur l'équilibre hydrique de la plante

L'intégrité et la croissance de la plante dépendent du continuum sol-plante-atmosphère, un flux ininterrompu régi par un gradient de potentiel hydrique décroissant. L'aspiration transpiratoire au niveau du feuillage constitue le moteur de cette dynamique, générant une tension qui permet l'ascension de la sève brute via les éléments conducteurs du xylème. Ce flux assure la turgescence des cellules, condition *sine qua non* pour le maintien du port de la plante et l'élongation cellulaire **(Durand, 2007)**.

En situation de sécheresse, la chute du potentiel hydrique édaphique entrave l'absorption racinaire, brisant la dynamique des flux au sein du végétal. La perte de turgescence qui en découle se traduit phénotypiquement par le flétrissement. Si le stress perdure, le phénomène de cavitation peut interrompre la colonne d'eau dans le xylème, neutralisant les fonctions vitales et pouvant entraîner la nécrose tissulaire et la mort de la plante **(Durand, 2007)**.

I.4.4. Impact sur la croissance et le développement

Le déficit hydrique agit comme un inhibiteur direct de l'organogenèse. La perte de turgescence freine prématurément l'élongation cellulaire. Ce processus d'expansion étant beaucoup plus sensible à la carence en eau que la division cellulaire elle-même, on observe une chute drastique des taux de croissance et un retard global du développement végétatif et reproductif **(Rahman & Hasegawa, 2012)**. La sécheresse s'apparente ainsi à un stress multidimensionnel altérant la division, l'expansion et la différenciation des tissus, tout en générant un désordre enzymatique profond **(Salehi-Lisar & Bakhshayeshan-Agdam, 2016)**.

Bien que la croissance radiculaire soit également impactée, elle l'est généralement dans une moindre mesure que celle de l'appareil caulinaire. Cette allocation préférentielle des ressources permet à la plante d'explorer le profil de sol plus en profondeur pour y puiser l'eau résiduelle. Concernant la fructification (qui

s'opère en trois phases : différenciation ovarienne, division puis expansion cellulaire), le stress hydrique affecte négativement le calibre et la biomasse des fruits. Lors d'épisodes sévères, il peut avorter la pollinisation et la nouaison, et réduire la pression de turgescence indispensable à la croissance du fruit **(koch, 2018)**.

I.5. Effets biochimiques du stress hydrique

Le stress hydrique déclenche une cascade de remaniements biochimiques à l'échelle cellulaire. La chute du potentiel hydrique désorganise le métabolisme primaire, forçant la cellule à réorienter ses voies de biosynthèse pour garantir sa survie. L'un des marqueurs biochimiques majeurs du déficit en eau est la surproduction d'espèces réactives de l'oxygène (ROS), telles que le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) et l'anion superoxyde ($O_2^{\bullet-}$). Si elles ne sont pas maîtrisées, ces ROS induisent un stress oxydatif létal, peroxydant les lipides membranaires, dénaturant les protéines et altérant les acides nucléiques, ce qui compromet la viabilité cellulaire et la croissance globale **(Zhang et al., 2019; Chaves et al., 2002; Mittler, 2002; Bajji et al., 2000)**.

En parallèle, ce stress agit comme un éliciteur du métabolisme spécialisé, en particulier de la voie des phénylpropanoïdes, stimulant la biosynthèse de molécules bioactives indispensables à l'acclimatation. Ces ajustements impliquent une reprogrammation fine du métabolisme primaire et secondaire, conférant à la plante la résilience nécessaire pour préserver son intégrité sous la contrainte **(Sharma et al., 2019; Mittler, 2002)**.

I.5.1. Stress oxydatif

La prolifération des espèces réactives de l'oxygène (ROS) engendre des modifications posttraductionnelles oxydatives sur les protéines, affectant particulièrement les groupements thiols des résidus soufrés (cystéine et méthionine). Ces altérations modifient la conformation et l'efficacité des complexes enzymatiques, grippant ainsi la machinerie métabolique **(Hasanuzzaman et al., 2019)**.

Ce stress oxydatif se manifeste par des dommages structurels colossaux touchant la bicouche lipidique, les chaînes polypeptidiques et la chromatine. En l'absence d'une réponse de détoxification adéquate, la cellule s'achemine vers la mort programmée, impactant sévèrement le rendement agronomique **(Chaves et al., 2002; Mittler, 2002; Bajji et al., 2000)**.

Pour endiguer ce phénomène, la plante mobilise son système de défense antioxydant, dont la composante non enzymatique inclut massivement les composés

phénoliques. Ces molécules agissent comme des "pièges" à radicaux libres (scavengers), protégeant les organites des attaques oxydatives **(Hasanuzzaman et al., 2019)**.

I.5.2. Mécanismes de défense de la plante

Face à la double contrainte hydrique et oxydative, les végétaux déploient une batterie de défenses :

- **L'induction des systèmes enzymatiques antioxydants :** La superoxyde dismutase (SOD), les catalases (CAT) et les peroxydases (POD) travaillent en synergie pour dismuter et réduire les ROS **(Mittler, 2002; Lawlor, 2002)**.
- **L'accumulation de composés non enzymatiques :** Les phénols, flavonoïdes et autres métabolites spécialisés assurent un bouclier antioxydant chimique **(Sharma et al., 2019)**.
- **La régulation stomatique et l'ajustement métabolique :** Ils visent à limiter la transpiration tout en adaptant la dépense énergétique pour maintenir la survie cellulaire **(Lawlor, 2002)**.

Les composés phénoliques occupent une place centrale dans cette stratégie d'évitement, agissant comme de véritables garants de l'intégrité cellulaire et de l'adaptation au déficit hydrique **(Sharma et al., 2019; Bajji et al., 2000; Lawlor, 2002)**.

I.5.3. Production de composés phénoliques

La contrainte hydrique agit comme un puissant stimulateur de la biosynthèse phénolique (acides phénoliques, flavonoïdes, tanins). Grâce à leur structure chimique riche en groupements hydroxyles, ces métabolites secondaires possèdent un fort pouvoir réducteur, leur permettant de neutraliser efficacement les ROS. Leur suraccumulation n'est donc pas un simple sousproduit du stress, mais un trait adaptatif majeur garantissant la tolérance de la plante **(Bajji et al., 2000; Lawlor, 2002; Sharma et al., 2019)**.

C'est ainsi la coopération étroite entre l'arsenal enzymatique et ces métabolites phénoliques qui permet le maintien de l’homéostasie et la survie prolongée face à la sécheresse **(Mittler, 2002; Hasanuzzaman et al., 2019)**.

I.6. Mécanismes d'adaptation des plantes au stress hydrique

I.6.1. Adaptations morphologiques

Sous l'influence du déficit hydrique, la plasticité phénotypique s'exprime par une série d'ajustements structuraux : réduction de la taille et de la surface foliaire (micrométrie), diminution de la densité stomatique, épaississement des parois pariétales et renforcement de la cuticule cireuse. On observe ponctuellement des anomalies du système vasculaire, l'enroulement des limbes (feuilles tubulaires) et une accélération de la sénescence. En profondeur, le système racinaire tend à s'allonger, modifiant le ratio racine/partie aérienne en faveur de l'exploration édaphique, bien que dans des cas extrêmes, la biomasse racinaire totale puisse régresser. Si ces remaniements optimisent l'efficience de l'eau, ils se font au détriment de l'interception lumineuse et de la productivité globale **(Akıncı, 2013 ; Rahman & Hasegawa, 2012)**.

I.6.2. Adaptations physiologiques

La fermeture stomatique constitue la première ligne de défense physiologique, limitant immédiatement la perte d'eau, mais entravant fatalement l'assimilation du CO_2. Ce mécanisme de contrôle est intimement piloté par l'acide abscissique (ABA), une phytohormone synthétisée par les racines en situation de sécheresse et transportée vers les feuilles. L'intensité de cette réponse est corrélée à l'effondrement de la conductance hydraulique, aux altérations de la teneur relative en eau, ainsi qu'au déficit de pression de vapeur à l'interface feuille-atmosphère. Cette gestion parcimonieuse de l'eau garantit la survie de la plante, au prix d'un arrêt transitoire de sa croissance **(Rahman & Hasegawa, 2012)**.

I.6.3. Adaptations moléculaires et biochimiques

À l'échelle moléculaire, l'acquisition de la tolérance au stress hydrique (*drought tolerance*) repose sur une cascade complexe de signalisation. Le stress est perçu par des osmosenseurs membranaires et transduit via des réseaux de kinases et de phospholipases. Ce signal active des facteurs de transcription spécifiques (tels que les DREB), qui orchestrent la reprogrammation génétique. Il en résulte la synthèse *de novo* d'enzymes antioxydantes (SOD, CAT), la surproduction d'osmoprotecteurs (proline, glutathion) et le maintien de la balance ionique et hydrique via l'activation des aquaporines et des transporteurs membranaires. C'est l'intégration de toutes ces voies métaboliques qui assure la protection structurelle et fonctionnelle du végétal, conférant ainsi une véritable résilience face à la sécheresse **(Rahman & Hasegawa, 2012,)**.

Chapitre II : Plantes médicinales et métabolites secondaires

Chapitre II : Plantes médicinales et métabolites secondaires

Les plantes médicinales et aromatiques constituent une source majeure de métabolites secondaires (polyphénols, flavonoïdes, terpènes), essentiels à leur adaptation environnementale. Ce chapitre explore leur diversité chimique et leurs voies de biosynthèse, tout en analysant l'influence des facteurs externes, notamment l'impact du stress hydrique sur leur concentration et sur la production des huiles essentielles.

II.1. Définition des plantes médicinales et aromatiques

Les plantes médicinales sont définies comme des ressources biologiques intégrées aux pratiques de santé depuis l'Antiquité, représentant un patrimoine précieux pour l'humanité **(Cardenas, 2014 ; Wairimu, 2025)**. Elles se caractérisent par la présence d'une ou plusieurs substances, appelées principes actifs, susceptibles d'être utilisées à des fins thérapeutiques sans effets nocifs aux doses recommandées **(Cardenas, 2014, cité par Chelighem et al., 2021/2022)**.

Considérées comme la forme la plus ancienne de médicament, ces plantes constituent le socle des systèmes de médecine traditionnelle à travers le monde **(Marrelli, 2021).** Selon **(SantosZea et al., 2020)**, elles représentent une ressource majeure pour l'extraction de métabolites secondaires tels que les saponines, les flavonoïdes et les phénols, valorisés pour leurs propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires ou anticancéreuses.

Dans cette même perspective, **(Khan et al., 2023)** précisent que ces composés bioactifs sont capables d'exercer des effets thérapeutiques variés, notamment grâce à la présence d'alcaloïdes, de terpènes et de polyphénols dotés de propriétés antimicrobiennes. On estime aujourd'hui qu'environ un cinquième des espèces végétales mondiales possède de telles propriétés curatives **(Wairimu, 2025)**.

Par ailleurs, pour faciliter leur étude, ces ressources font l'objet de diverses classifications. Selon **(Abdul Qadir, 2021)**, on distingue les classifications thérapeutique, commerciale et morphologique. Cette dernière, basée sur l'organe végétal exploité, est détaillée dans le tableau suivant :

Tableau II.**1 : Classification morphologique des plantes médicinales et aromatiques selon l'organe utilisé (Abdul Qadir, 2021).**

Organe utilisé	Exemples de plantes
Feuilles	Menthe, Basilic, Henné, Thé
Fleurs	Camomille, Jasmin, Rose, Hibiscus

Fruits	Carvi, Coriandre, Anis
Graines	Nigelle, Moutarde, Café, Fenugrec
Écorces	Cannelle, Saule
Racines / Rhizomes	Réglisse, Gingembre, Curcuma
Plante entière	Datura, Pervenche (*Vinca*)

II.2. Importance thérapeutique et économique des plantes médicinales

L'importance des plantes médicinales et aromatiques se manifeste à la fois par leur rôle crucial dans la santé publique et par leur impact grandissant sur l'économie mondiale.

II.2.1. Importance thérapeutique

Sur le plan médical, ces ressources constituent un vivier fondamental de molécules naturelles exploitées dans le développement de nombreux médicaments modernes. À titre d'exemple, des substances actives majeures ont été isolées à partir de diverses espèces, telles que la réserpine extraite du genre *Rauwolfia*, ou la vinblastine issue de *Catharanthus roseus* **(Sofowora, 1982/2010)**.

Cette importance est particulièrement capitale dans les pays en développement, où environ 80 % de la population dépendent de la médecine traditionnelle pour les soins de santé primaires, en raison de l'accessibilité de ces ressources et de leur adéquation avec les cultures locales **(Wairimu, 2025)**. Cependant, bien que les préparations traditionnelles soient souvent mieux tolérées par l'organisme que les molécules synthétiques, leur usage requiert une grande vigilance. En effet, certains composés comme l'ésérine ou la strychnine présentent une toxicité aiguë, tandis que d'autres plantes, à l'instar de *Symphytum officinale*, contiennent des alcaloïdes susceptibles de provoquer des effets hépatotoxiques (Sofowora, 1982/2010).

II.2.2. Perspectives économiques et Marché

Sur le plan économique, l'utilisation des plantes médicinales participe activement à la réduction des dépenses de santé pour les ménages, particulièrement en milieu rural **(Wairimu, 2025).** Le marché mondial des extraits botaniques et des médicaments d'origine naturelle est actuellement estimé à plusieurs centaines de milliards de dollars.

Dans ce contexte, certains pays occupent une position stratégique ; l'Égypte, par exemple, se classe au onzième rang mondial des exportateurs, avec une part de marché

dominante pour les huiles essentielles de jasmin, de menthe et de basilic. Environ 90 % de la production de ces plantes y est destinée à l'exportation, constituant ainsi une source majeure de devises **(Abdul Qadir, 2021).** La transition croissante vers des remèdes naturels et biologiques stimule la création de nouvelles filières à haute valeur ajoutée et participe ainsi à la lutte contre la pauvreté **(Wairimu, 2025).**

Il convient toutefois de préciser que l'importance de ces ressources, tant sur le plan thérapeutique qu'économique, est intrinsèquement liée à la qualité de leurs principes actifs. En effet, la teneur en métabolites secondaires dépend de plusieurs facteurs environnementaux : la température module la teneur en huiles volatiles, tandis que la lumière influence la synthèse de certains alcaloïdes. De plus, l'altitude et les propriétés édaphiques jouent un rôle déterminant dans la concentration des substances bioactives **(Abdul Qadir, 2021).** Cette variabilité écologique justifie ainsi l'étude détaillée des différentes classes de métabolites secondaires.

II.3. Classification des métabolites secondaires

Les métabolites secondaires sont synthétisés dans des tissus spécifiques de la plante et peuvent être stockés dans d'autres organes, affichant une grande diversité de structures chimiques selon les espèces. Ils sont généralement présents en faibles quantités et leur production est étroitement corrélée au stade de développement du végétal **(Thi Dao, 2008, cité par Chelighem et al., 2021/2022)**.

Sur la base de leurs structures chimiques et de leurs voies de biosynthèse, on distingue principalement trois grandes classes de composés :

II.3.1. Les composés phénoliques

Ils possèdent un noyau aromatique pourvu de groupements hydroxyles libres ou liés à des sucres. Ces molécules sont omniprésentes dans l'ensemble des organes végétaux (racines, tiges, feuilles, fleurs, fruits et graines). Parmi les représentants les plus notables figurent les anthocyanes, les flavonoïdes et les tannins **(Boizot & Charpentier, 2006, cité par Chelighem et al., 2021/2022)**.

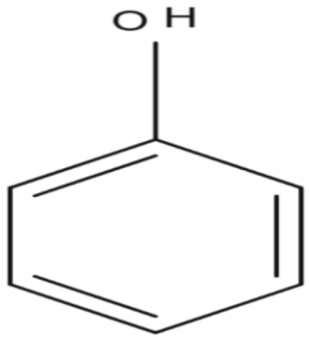


Figure II.**1 : Structure chimique d'un composé phénolique (KECIS, 2023).**

II.3.2. Les alcaloïdes

Ce sont des composés azotés, souvent cristallins, issus du métabolisme des acides aminés. Si certains sont réputés pour leur toxicité fulgurante (strychnine, aconitine), d'autres possèdent des applications médicales fondamentales telles que la morphine, la codéine et la quinine **(Evans, 2009 ; Nsemi, 2010, cités par Chelighem et al., 2021/2022)**.

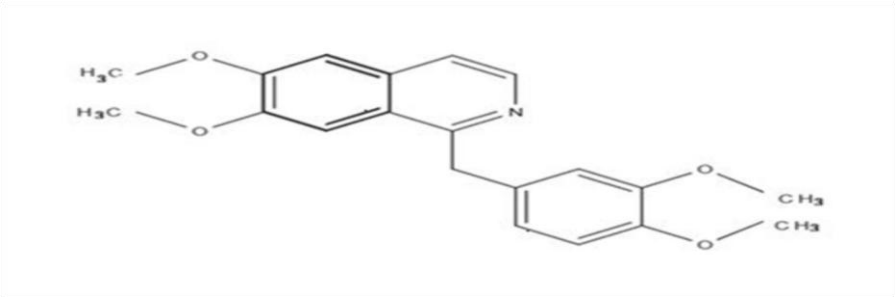


Figure II.**2 : Structure générale des alcaloïdes (Anonyme, 2022, cité par Chelighem et al., 2021/2022).**

II.3.3. Les composés terpéniques

Ils constituent la classe la plus vaste et résultent de la polymérisation d'unités isoprèniques (C5H8). Cette catégorie regroupe notamment les monoterpènes, les sesquiterpènes, les diterpènes et les triterpènes, qui assurent des fonctions essentielles dans la protection et la pigmentation du végétal **(Ejaz et al., 2017, cité par Chelighem et al., 2021/2022)**.

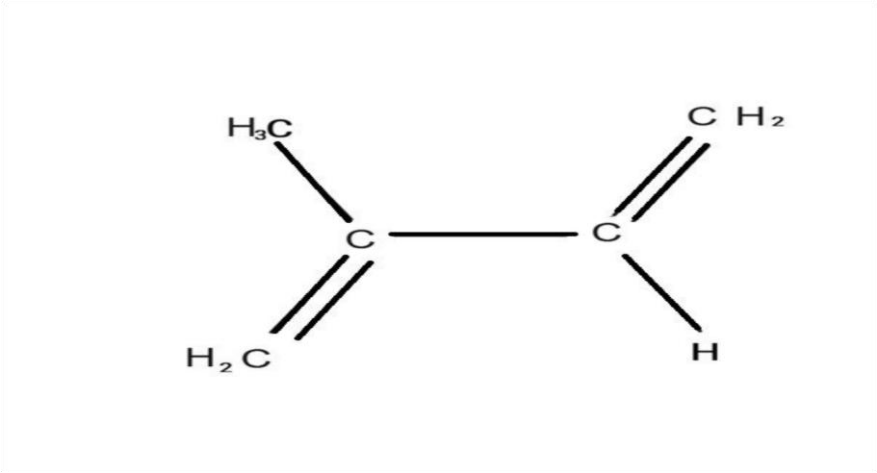


Figure II.3 **: Structure de l'isoprène (Mouhi, 2017, cité par Chelighem et al., 2021/2022).**

II.4. Les composés phytochimiques

II.4.1. Les Polyphénols

La définition des composés phénoliques, ou polyphénols, repose sur la combinaison de leurs caractéristiques structurales et de leur origine biogénique. Ils se distinguent par la présence d'un noyau benzénique lié à un groupement hydroxyle, lequel peut être libre ou engagé dans des fonctions ester, éther ou hétéroside **(Bruneton, 1999, cité par Hammoudi, 2015)**. Cette architecture moléculaire spécifique leur confère des propriétés justifiant leur utilisation dans des domaines très diversifiés **(Sarni-Manchado et Cheynier, 2006 ; Proestos et al., 2006, cités par Hammoudi, 2015).** Ces métabolites secondaires jouent un rôle clé dans la croissance et la reproduction des plantes, tout en assurant une protection efficace contre les herbivores et les agents pathogènes. Sur le plan biologique, ils se démarquent par de puissantes propriétés antioxydantes, antivirales et antibactériennes **(Bravo, 1998 ; Kan et al., 2007, cités par Hammoudi, 2015)**.

Présents dans toutes les parties des plantes supérieures, ils interviennent dans la division cellulaire, la germination, la rhizogenèse et la maturation des fruits. Les sous-classes les plus étudiées incluent les anthocyanines, les flavonoïdes et les tannins **(Boizot & Charpentier, 2006, cité par Chelighem et al., 2021/2022)**. Largement distribuées dans le règne végétal, ces molécules sont principalement synthétisées via la voie de l'acide shikimique, conduisant à la formation des phénylpropanoïdes sous l'action d'enzymes clés telles que la phénylalanine ammonia-lyase (PAL). La détection biochimique des

polyphénols repose couramment sur leur réaction avec le chlorure ferrique (FeCl3), générant une coloration vert foncé ou bleu-noir caractéristique **(KECIS, 2023)**.

II.4.2. Les Flavonoïdes

Les flavonoïdes occupent une place prépondérante parmi les composés phénoliques naturels. En tant que pigments quasi universels chez les plantes, ils sont responsables de la coloration des fleurs, des fruits et parfois des feuilles. De multiples propriétés thérapeutiques leur sont attribuées, incluant des effets veinotoniques, antitumoraux, anti-inflammatoires et antibactériens. Ils sont également reconnus pour leur capacité à moduler l'activité de plusieurs récepteurs et complexes enzymatiques cellulaires **(Bruneton, 1999, cité par Hammoudi, 2015)**.

Ces pigments présentent une structure de base en C6-C3-C6 et protègent les tissus végétaux contre les rayonnements ultraviolets. On en distingue plusieurs sous-groupes selon le degré d'oxydation de leur hétérocycle, tels que les flavones, les flavonols et les flavanones **(Chelighem et al., 2022)**.

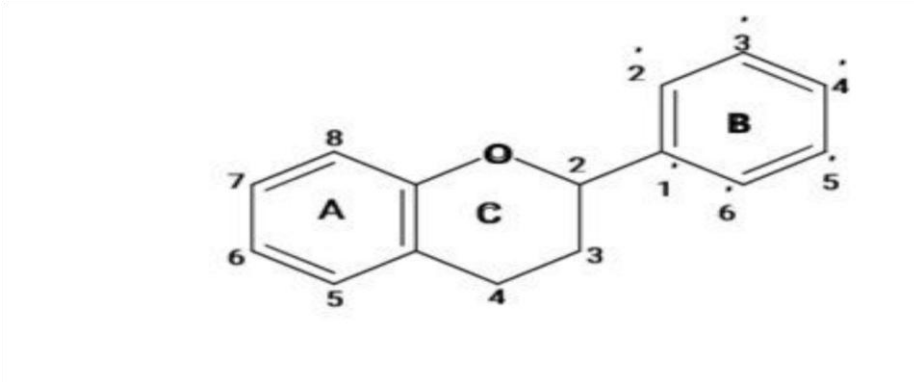


Figure II.4 **: Structure de base des flavonoïdes (Coa et al., 1997, cité par Chelighem et al., 2022).**

La caractérisation phytochimique des flavonoïdes est confirmée par le test de la cyanidine (ou test à la tournure de magnésium en milieu acide), où l'addition de magnésium et d'acide chlorhydrique à l'extrait induit l'apparition d'une coloration rose à rouge vif **(KECIS, 2023)**.

II.4.3. Les Terpènes

Tous les terpènes dérivent d'un précurseur universel : l'isopentényle diphosphate (IPP) et son isomère, le diméthylallyle diphosphate (DMAPP). Ils sont synthétisés au travers de deux voies métaboliques distinctes : la voie du mévalonate (MVA) localisée dans le cytosol, générant les sesquiterpènes et les triterpènes, et la voie du méthylérythritol

phosphate (MEP) au sein des plastes, conduisant aux monoterpènes et aux caroténoïdes **(Ejaz et al., 2017, cité par Chelighem et al., 2022)**.

Ces hydrocarbures, prédominants dans les huiles essentielles et répondant souvent à la formule brute (C10H16)n, constituent la classe des « terpènes vrais ». La proportion de terpènes est généralement plus élevée chez les tissus jeunes, et la majorité d'entre eux, à l'instar du pinène et du limonène, possèdent une activité optique **(Brock, 1925)**. Les terpènes suscitent un engouement majeur en pharmacologie ; le Taxol, par exemple, isolé chez la famille des *Taxaceae*, est un puissant agent antimitotique largement prescrit en chimiothérapie anticancéreuse **(Wairimu, 2025)**.

II.4.4. Les Huiles Essentielles

- **Définition**

Les huiles essentielles sont des mélanges biochimiques complexes de substances organiques aromatiques liquides, naturellement synthétisées par diverses parties de la plante. Elles se caractérisent par leur forte concentration, leur volatilité et leur thermolabilité **(Bruneton, 1999, cité par Hammoudi, 2015)**. Souvent fluides et lipophiles (insolubles dans l'eau), elles trouvent des applications industrielles majeures en cosmétologie (parfumerie), en agroalimentaire (arômes) et en thérapeutique grâce à leurs puissantes propriétés pharmacologiques **(Engonga, 2009, cité par Chelighem et al., 2021/2022)**.

En tant que fractions volatiles du métabolisme spécialisé, les huiles essentielles dévoilent une composition chimique hétérogène et un profil odoriférant distinctif. Elles sont stockées dans des structures histologiques spécialisées (glandes épidermiques, poches ou canaux sécréteurs) et ne constituent pas des corps chimiques purs, mais un assemblage complexe de différentes classes de métabolites **(Brock, 1925 ; KECIS, 2023)**.

- **Méthodes et Principe d'extraction**

À l'échelle du laboratoire, l'extraction des huiles essentielles à partir de la biomasse aérienne est classiquement réalisée au moyen d'un appareillage de type Clevenger. Ce procédé, d'une durée moyenne de quatre heures, garantit l'épuisement optimal de la matière végétale et l'extraction de la majorité de la fraction volatile **(Velasco-Negueruela et Perez-Alonso, 1990, cités par Hammoudi, 2015)**.

Le principe de cette méthode, désignée sous le terme d'hydrodistillation, repose sur une distillation hétérogène où la matrice végétale, immergée dans l'eau, est portée à ébullition. L'énergie thermique provoque l'éclatement des structures sécrétrices et la

libération des composés aromatiques, qui sont alors entraînés par la vapeur d'eau sous forme de mélange azéotropique **(Bruneton, 1999, cité par Hammoudi, 2015)**.

Sur le plan thermodynamique, cette technique abaisse la température de distillation des principes volatils à environ 100°C, bien en deçà de leur point d'ébullition réel. Suite à la condensation des vapeurs, le distillat se décante en deux phases distinctes en raison de leur différence de densité et d'affinité : une phase aqueuse (hydrolat) et une phase organique surnageante, correspondant à l'huile essentielle **(Velasco-Negueruela et Perez-Alonso, 1990 ; Bruneton, 1999, cités par Hammoudi, 2015)**.

II.5. Biosynthèse des métabolites secondaires

La biosynthèse des métabolites secondaires s'inscrit dans un réseau métabolique hautement complexe et dynamique **(Pu et al., 2024)**. Reflétant leur immense diversité chimique, leur genèse s'amorce aux carrefours du métabolisme primaire pour se ramifier vers des voies spécialisées. Celles-ci sont finement régulées par le type cellulaire, le stade ontogénique du végétal, ainsi que par les stimuli environnementaux **(Patra et al., 2013)**. Ces composés sont classifiés en trois grandes catégories biosynthétiques : les composés azotés, les composés phénoliques et les terpènes **(Ashraf et al., 2018)**.

II.5.1. Historique

D'un point de vue historique, avant l'avènement des techniques analytiques modernes dans les années 1950, l'étude de l'origine biogénique des métabolites secondaires reposait sur des postulats théoriques fondés sur des analogies structurales. Ces déductions avaient permis d'esquisser les premiers précurseurs métaboliques potentiels, bien qu'elles manquassent de preuves empiriques.

Ultérieurement, l'essor des méthodes isotopiques et enzymatiques a validé ces hypothèses, menant à la cartographie des quatre grandes voies de biosynthèse végétales (dont la voie du shikimate et celle du mévalonate), révélant ainsi les fondements biochimiques de l'extraordinaire chimiotaxonomie des plantes **(Bentley, 1999)**.

II.5.2. Voie du shikimate

La voie de l'acide shikimique est une séquence métabolique exclusive aux plantes et à certains micro-organismes, dédiée à la synthèse des acides aminés aromatiques : la phénylalanine, la tyrosine et le tryptophane. Elle s'initie par la condensation de deux métabolites primaires : le phosphoénolpyruvate (issu de la glycolyse) et l'érythrose-4-phosphate (issu de la voie des pentoses phosphates), générant l'acide 3-désoxy-D-arabino-heptulosonique-7-phosphate (DAHP). S'ensuit une cascade de réactions enzymatiques

(cyclisation, déshydratation, phosphorylation) transformant cette structure aliphatique en un noyau aromatique pour aboutir au chorismate **(Herrmann, 1995)**.

Le chorismate constitue un point de branchement crucial. À partir de ce nœud métabolique, de multiples voies divergent pour synthétiser non seulement les acides aminés aromatiques, mais également une vaste gamme de métabolites secondaires indispensables à l'écologie chimique de la plante, tels que les alcaloïdes indoliques, les composés phénoliques, les lignines et les phytoalexines **(Maeda & Dudareva, 2012)**.

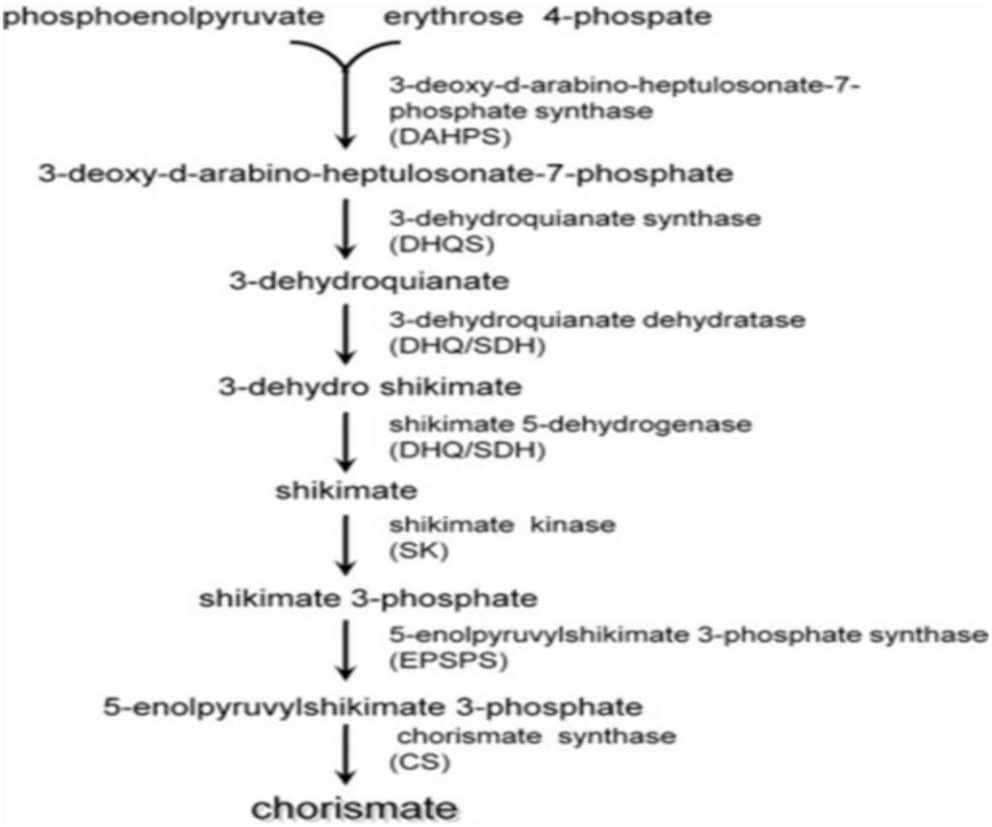


Figure II**.5 : La Voie du shikimate (Herrmann, 1995).**

II.5.3. Voie du mévalonate

La voie du mévalonate représente l'un des deux axes de biosynthèse des isoprénoïdes, une superfamille regroupant plus de 22 000 structures identifiées. Si certains de ces composés assument des fonctions métaboliques primaires (chaînes phytol des chlorophylles, régulateurs de croissance), une immense majorité agit comme métabolites secondaires intervenant dans les stratégies de défense ou les interactions biotiques **(Liao et al., 2016)**.

La synthèse des précurseurs isopréniques (IPP) chez les végétaux est compartimentée : la voie du mévalonate (MVA) opère dans le cytosol, tandis que la voie du méthylérythritol phosphate (MEP) se déroule dans les plastes. Dans la voie MVA, l'assemblage débute par la condensation de molécules d'acétyl-CoA pour former le HMG-CoA, qui subit ensuite

une réduction déterminante catalysée par la HMG-CoA réductase pour générer l'acide mévalonique. De successives phosphorylations et une décarboxylation transforment finalement ce dernier en isopenténylе diphosphate (IPP) **(Champenoy et al., 1999)**.

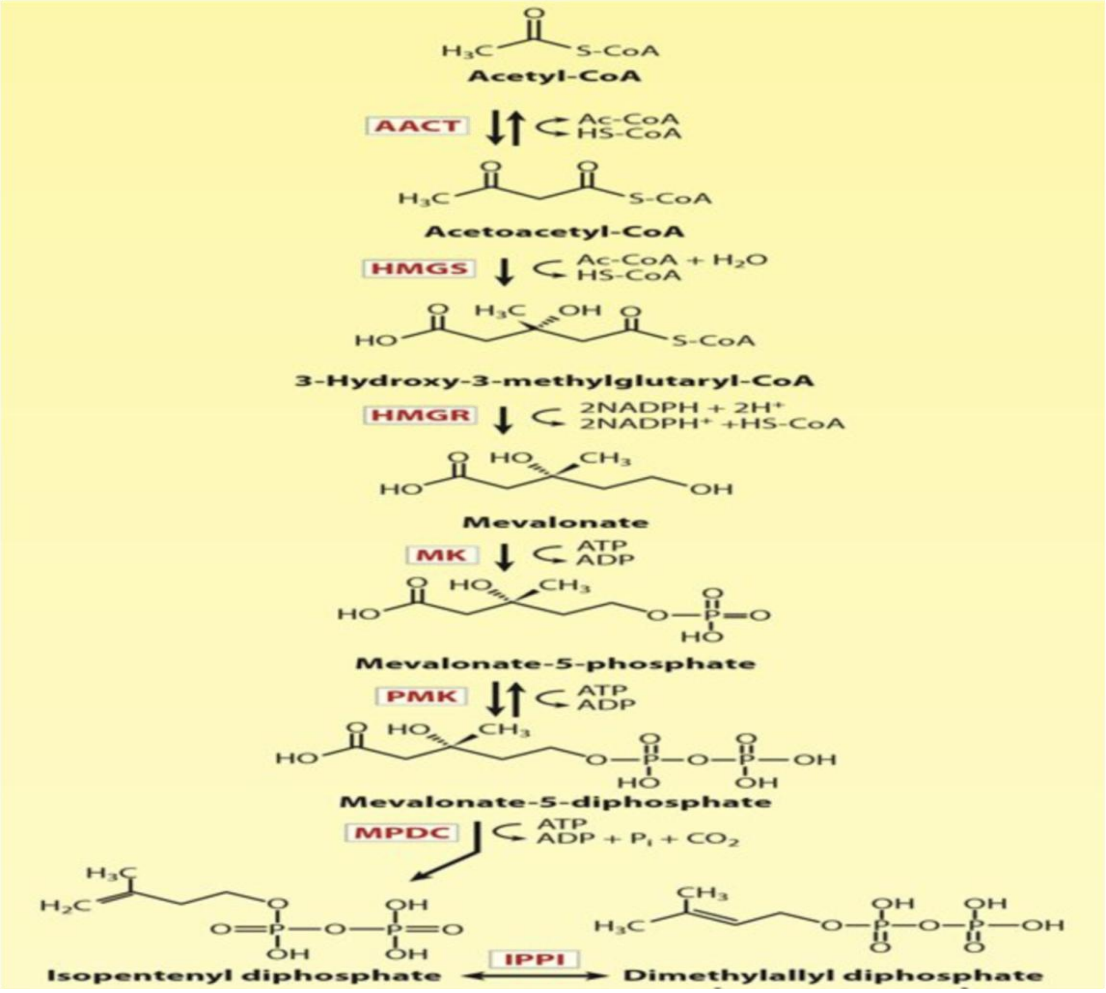


Figure II.**6 : La voie du mévalonate (Vranová et al., 2013).**

II.5.4. Influence des facteurs environnementaux sur la biosynthèse

II.5.4.1. Stress abiotiques

Soumises à des contraintes environnementales fluctuantes, les plantes déploient une plasticité métabolique marquée par la surproduction de métabolites spécialisés. Le stress salin, induisant un désordre osmotique et une toxicité ionique, favorise l'accumulation de polyphénols et d'anthocyanes. Le stress hydrique, en générant des espèces réactives de l'oxygène (ROS), agit comme un éliciteur majeur stimulant la synthèse de phénols, de terpènes et d'alcaloïdes. De son côté, le stress thermique altère l'intégrité membranaire et

enzymatique, modulant le profil des huiles essentielles et des caroténoïdes **(Reshi et al., 2023).**

L'environnement lumineux exerce également un contrôle transcriptionnel strict : une forte irradiance exalte la biosynthèse des flavonoïdes, tandis que le rayonnement ultraviolet B (UV-B) induit spécifiquement la production de phénols absorbants agissant comme des écrans solaires internes **(Qaderi et al., 2023).**

II.5.4.2. Stress biotiques

Face aux agressions par des agents pathogènes (bactéries, champignons, nématodes) ou des herbivores, la plante, dépourvue de mobilité, orchestre une riposte chimique massive. Cette immunité induite se traduit par l'efflux de phytoalexines aux puissantes propriétés antimicrobiennes. L'infection fongique, par exemple, provoque un pic d'accumulation de composés phénoliques fongitoxiques aux sites d'infection. Dès que la menace est neutralisée, la plante entame une phase de récupération au cours de laquelle la concentration de ces métabolites de défense tend à se normaliser **(Ashraf et al., 2018)**.

II.6. Effet du stress hydrique sur la composition phytochimique

Le déficit hydrique agit comme un puissant modulateur du chimisme végétal. Face à la sécheresse, la plante restreint son métabolisme primaire au profit des voies de biosynthèse secondaires, générant une cascade de molécules bioactives (polyphénols, flavonoïdes, terpènes) destinées à circonscrire les dommages oxydatifs cellulaires **(Hasanuzzaman et al., 2019)**. Chez certaines espèces modèles telles que *Malva sylvestris*, cette privation d'eau se solde par une majoration notable de l'activité antioxydante globale de l'extrait, illustrant une acclimatation biochimique performante **(Gharibi et al., 2024)**.

II.6.1. Variation de la concentration des métabolites secondaires

La cinétique d'accumulation des métabolites secondaires suit une courbe dose-dépendante par rapport à l'intensité du stress. Un déficit hydrique modéré se comporte comme un éliciteur optimal, déclenchant l'expression des gènes de biosynthèse et maximisant la teneur en molécules antioxydantes. Cependant, si le stress devient trop sévère et prolongé, l'effondrement global du métabolisme carboné inhibe la synthèse de ces mêmes composés, entraînant une chute de leur concentration. L'amplitude de cette variation reste fondamentalement assujettie au profil génétique et à la tolérance intrinsèque de l'espèce étudiée **(Shil et al., 2021 ; Kiani et al., 2024)**.

II.6.2. Relation entre le stress hydrique et la production des huiles essentielles

Le régime hydrique gouverne directement la dynamique des composés volatils. Un stress hydrique modéré favorise fréquemment l'augmentation de la densité des glandes

sécrétrices et stimule la biosynthèse des terpènes, générant ainsi un rendement supérieur en huile essentielle. À l'inverse, un stress hydrique extrême perturbe sévèrement l'assimilation photosynthétique, ce qui assèche les réserves carbonées nécessaires à la voie du mévalonate/MEP. Il en résulte un effondrement du rendement d'extraction et une altération drastique du chémotype de l'huile, témoignant de l'épuisement métabolique de la plante **(Gharibi et al., 2024 ; Shil et al., 2021)**.

Chapitre III : Étude des plantes sélectionnées

Chapitre III : Étude des plantes sélectionnées

Les plantes médicinales et aromatiques suscitent un intérêt scientifique croissant en raison de leur richesse en métabolites secondaires et de leurs nombreuses propriétés thérapeutiques. Dans ce cadre, le présent chapitre se propose d'étudier certaines espèces d'intérêt, notamment *Lavandula* et *Rosmarinus* à travers l'analyse de leur classification botanique, de leurs caractéristiques morphologiques, de leur répartition géographique ainsi que de leur composition chimique. Une attention particulière sera portée à leurs usages médicinaux ainsi qu'à l'influence du stress hydrique sur leur fonctionnement physiologique et sur la biosynthèse des composés actifs, en particulier les huiles essentielles. Enfin, ce chapitre mettra en lumière l'importance de ces plantes en Algérie, avec un intérêt spécifique pour la région de Skikda, en examinant les conditions climatiques et leur rôle dans l'adaptation et la valorisation de ces ressources végétales.

III.1. Classification et diversité botanique

- **Étymologie et importance**

Le nom Lavandula dérive du verbe latin lavare (laver), en référence à l'usage ancien de la plante pour parfumer l'eau des bains **(Upson, 2002)**. Actuellement, le genre Lavandula est considéré comme un groupe complexe comprenant plus de 30 espèces ainsi que de nombreux hybrides **(Batiha et al., 2023)**. Sur le plan systématique, il est rattaché à la tribu des Lavanduleae au sein de la famille des Lamiaceae **(Upson, 2002)**.

- **Aperçu historique**

Selon **(Lis-Balchin 2002)**, une étape importante dans la classification du genre a été réalisée par Chaytor en 1937, qui a proposé une division en cinq sections. Les espèces à intérêt économique et médicinal sont principalement regroupées dans deux sections majeures ; la section Stoechas (ex : *L. stoechas*, *L. dentata*) et la section
Spica (ex : *L. officinalis*, *L. latifolia*).

- **Formes hybrides**

Il est également établi que de nombreuses formes cultivées sont issues d'hybridation naturelle ou artificielle. Le lavandin (*Lavandula* × *intermedia*) constitue l'hybride le plus connu, résultant du croisement entre la lavande vraie (*L. angustifolia*) et la lavande aspic (*L. latifolia*) **(Lis-Balchin, 2002 ; Batiha et al., 2023).**

- **Classification phylogénétique**

Selon la classification phylogénétique moderne basée sur le système APG, le genre Lavandula appartient aux angiospermes eudicotylédones et se situe dans l'ordre des

Lamiales, au sein de la famille des Lamiaceae **(Belmont, 2013).** Le tableau suivant résume la position systématique du genre Lavandula selon la classification phylogénétique (APG).

Tableau III.1 : Classification taxonomique du genre Lavandula selon le système APG (Belmont, 2013).

Nom Scientifique	***Rang Taxonomique***
Plantae	*Règne*
Astéridées	*Sous-classe*
Euastéridées I	*Euastéridées*
Lamiales	*Ordre*
Lamiacées (ex Labiées)	*Famille*
Lavandula	*Genre*



Figure III.1 : **Aspect général de *Lavandula sp.* (Batiha et al., 2023).**

III.2. Description morphologique générale

- **L'appareil végétatif**

Les espèces du genre Lavandula se caractérisent par un port buissonnant de type sous-arbrisseau, pérenne et persistant. Elles forment généralement une masse dense et globuleuse dont la taille varie de 40 cm à 1 mètre selon les conditions pédoclimatiques

(Batiha et al., 2023). La tige est quadrangulaire, devenant ligneuse avec l'âge à sa base, tandis que les rameaux supérieurs restent herbacés **(Upson, 2002)**.

Le système racinaire est vigoureux, fibreux et particulièrement ramifié, ce qui permet à la plante une excellente adaptation aux sols arides. Les feuilles, de forme linéaire à lancéolée, présentent souvent un bord entier ou légèrement ondulé ; elles sont recouvertes d'un tomentum (duvet de poils protecteurs) qui joue un rôle physiologique crucial dans la limitation de l'évapotranspiration **(Lis-Balchin, 2002)**.

- **L'appareil reproducteur (Inflorescence)**

Les fleurs sont regroupées en inflorescences de type épis terminaux, portées par de longs pédoncules. Ces épis sont constitués de plusieurs verticilles de fleurs (cymes) resserrées. Chaque fleur est protégée par une bractée persistante dont la forme constitue un critère taxonomique essentiel (Voir Figure 02). La corolle est tubulaire et bilabiée (Voir Figure 03), présentant une palette de couleurs allant du bleu pâle au violet intense. Un caractère diagnostique fondamental qui distingue le genre Lavandula des autres genres de la famille est la structure de son nectaire : les lobes du nectaire sont positionnés de manière opposée aux quatre ovaires **(Upson, 2002)**.

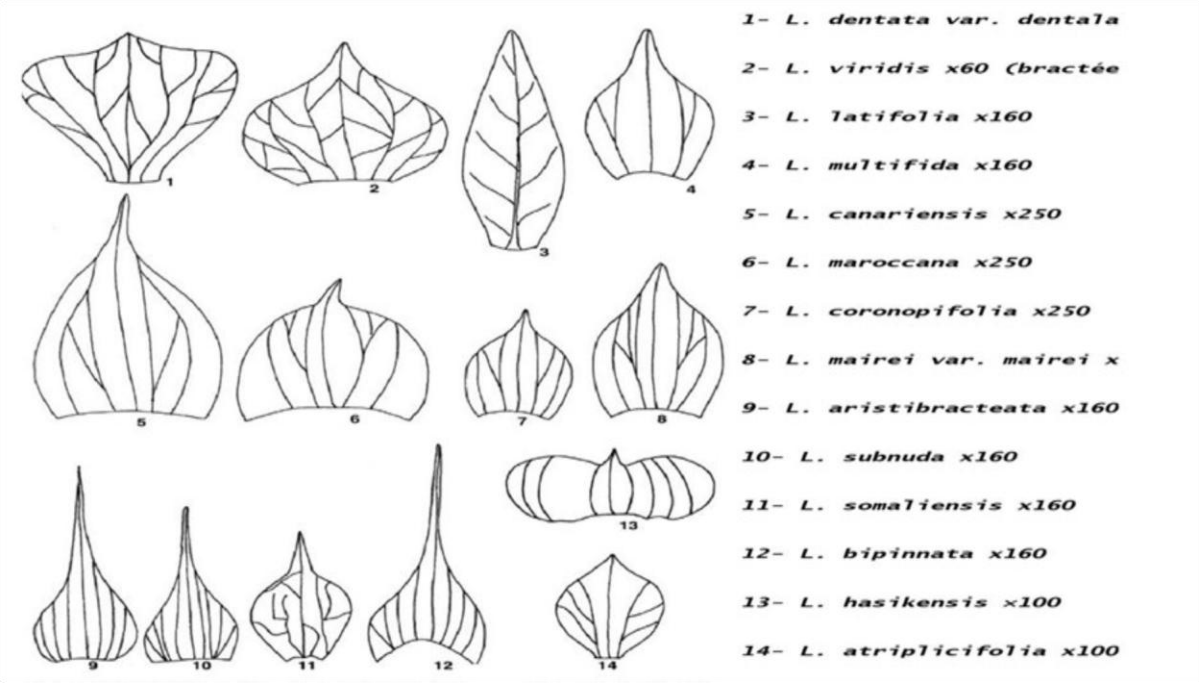


Figure III.2 : Exemples illustrant la diversité des formes de bractées chez le genre Lavandula. (Upson 2002).

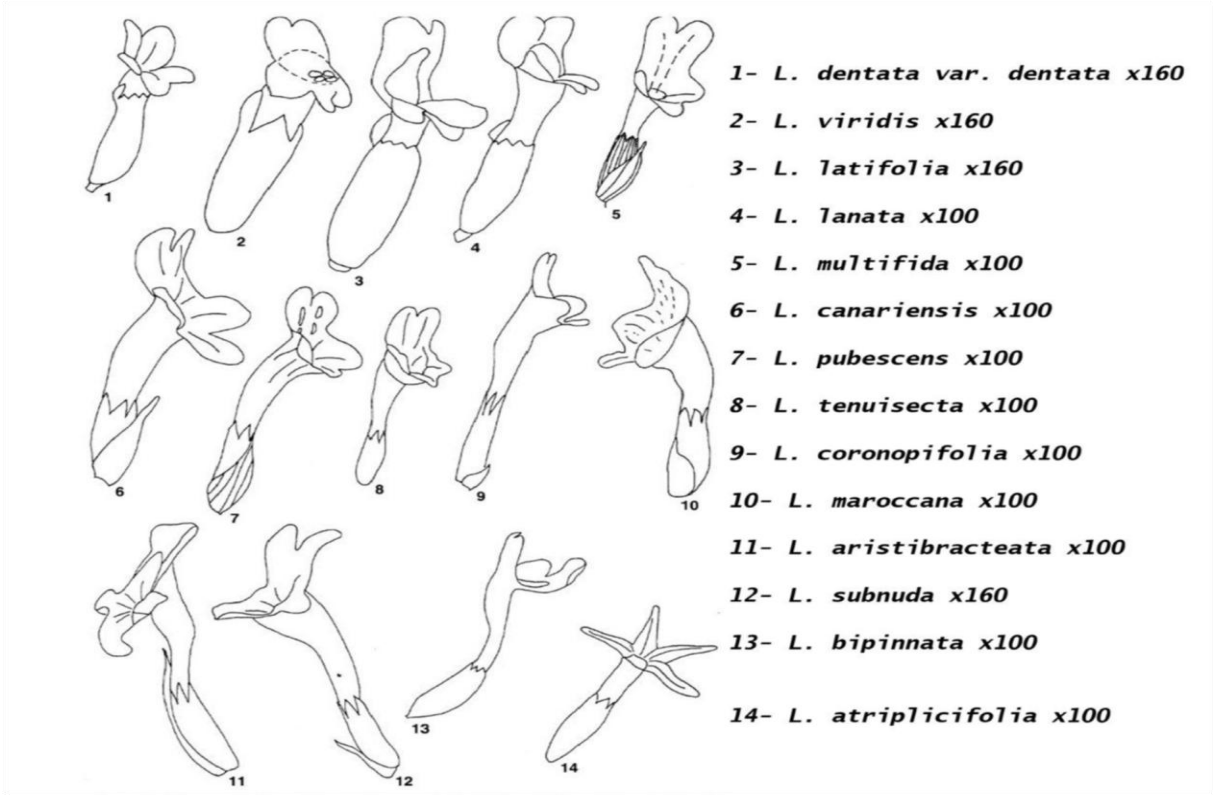


Figure III.3 : **Variation de la morphologie de la corolle au sein du genre Lavandula.. (Upson 2002).**

- **Les structures sécrétrices**

La valeur pharmacologique et aromatique du genre réside dans ses glandes à huiles essentielles. Ce sont des trichomes glandulaires spécialisés, localisés principalement sur le calice (Voir Figure 04) et les feuilles. Ces glandes synthétisent et stockent les métabolites secondaires qui sont libérés lors de la floraison ou par frottement, conférant à la plante son odeur caractéristique **(Lis-Balchin, 2002).**

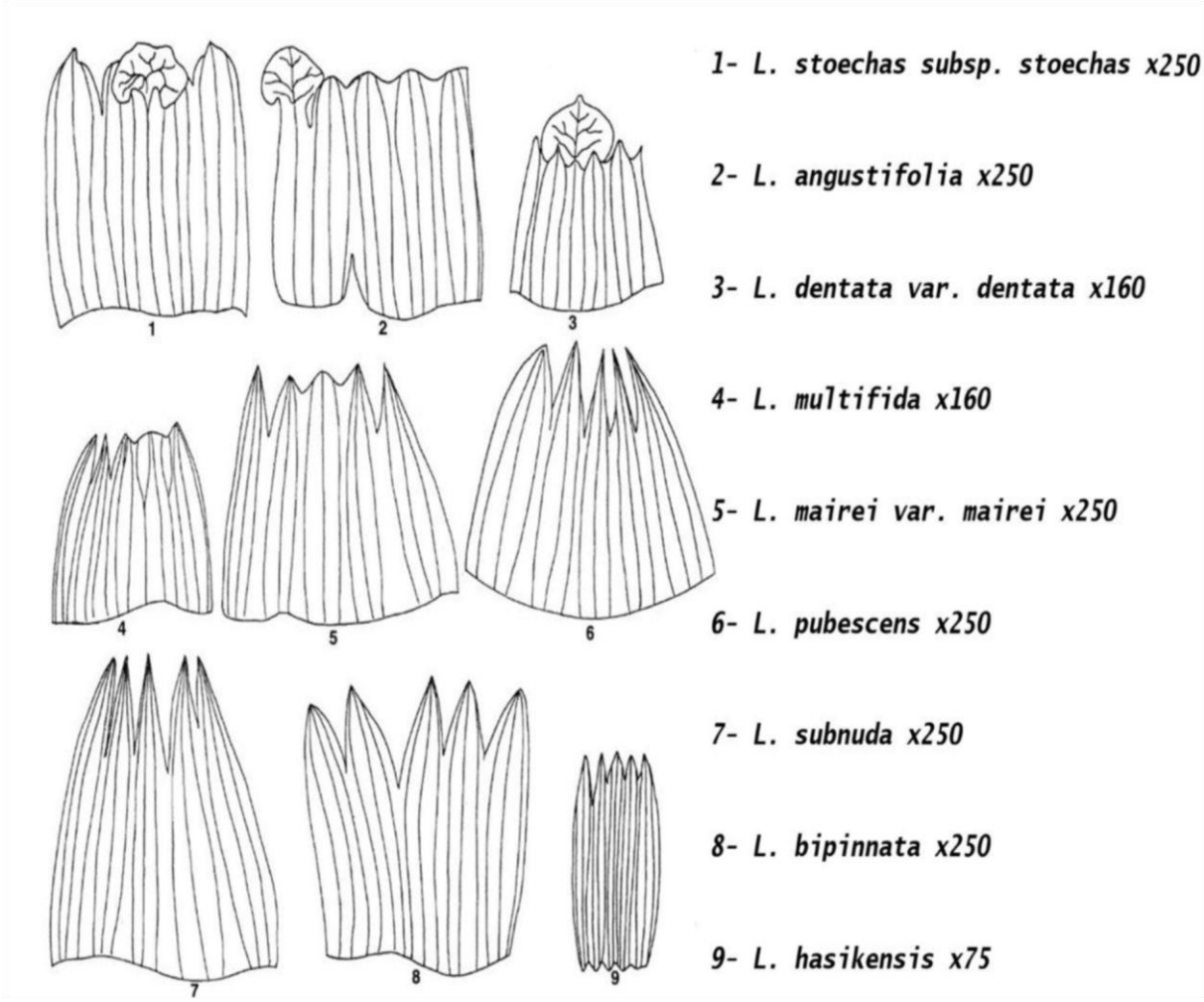


Figure III.4 : **Exemples de variation des calices au sein du genre Lavandula, illustrant les différences entre les lobes du calice.(Upson 2002).**

II.3. Distribution géographique et habitat

- **Origine et aire de répartition naturelle**

Le genre Lavandula possède une distribution géographique vaste mais discontinue. Il est principalement indigène des régions bordant le bassin méditerranéen, s'étendant du sud de l'Europe jusqu'à l'Afrique du Nord **(Batiha et al., 2023).** Selon **(Upson 2002),** son aire naturelle s'étend également des îles de l'Atlantique (Canaries, Madère, Cap-Vert) jusqu'en Inde, en passant par le MoyenOrient, la péninsule arabique et l'Afrique du Nord-Est tropicale.

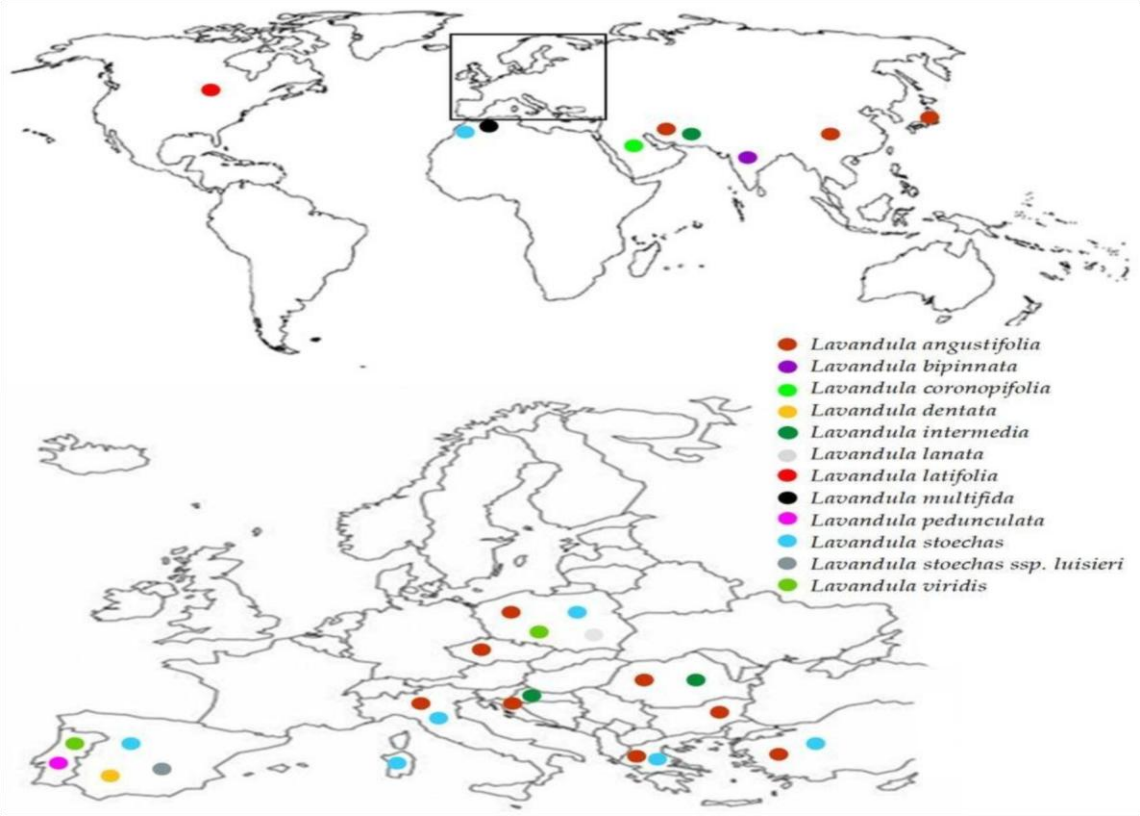


Figure III.5 : Répartition mondiale des principales espèces du genre Lavandula. (Dobros et al. 2023).

- **Habitat et conditions de développement**

Dans son milieu naturel, le genre Lavandula se développe préférentiellement dans des zones fortement ensoleillées et sur des sols bien drainés **(Batiha et al., 2023).** Bien que certaines espèces soient originaires de pays tels que la France, l'Espagne et l'Italie, elles présentent une grande capacité d'adaptation à divers environnements méditerranéens et semi-arides.

- **Expansion et culture mondiale**

Bien que le sud de la France soit historiquement considéré comme un centre majeur de diversité, les espèces de Lavandula ainsi que leurs hybrides, notamment le lavandin 'Grosso', font aujourd'hui l'objet d'une culture intensive à l'échelle mondiale **(Lis-Balchin, 2002).** Cette expansion est principalement motivée par l'importance économique de la plante dans les secteurs de la parfumerie, de la cosmétique et de la pharmacologie.

III.4. Composition chimique

- **Composition générale**

Le genre Lavandula se caractérise par une grande diversité de métabolites secondaires. Il contient principalement des huiles essentielles, mais également des

composés phénoliques, des flavonoïdes, des coumarines, des tanins, des anthocyanines, des phytostérols, ainsi que divers acides organiques tels que les acides coumarique, glycolique, valérique et ursolique **(Batiha et al., 2023).**

- **Composition des huiles essentielles**

L'huile essentielle constitue la fraction la plus importante sur le plan pharmacologique. Elle est dominée par des composés terpéniques, notamment les monoterpènes et leurs dérivés oxygénés **(Batiha et al., 2023).**

Chez Lavandula angustifolia, espèce de référence, la composition chimique est caractérisée par une prédominance des monoterpènes oxygénés (plus de 80%). Les principaux constituants identifiés par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC-MS) sont l'1,8-cinéole (38,4 %), le bornéol (17,83 %) et le camphre (16,1 %) **(Hosseini et al., 2025).**

Par ailleurs, d'autres études indiquent que l'huile essentielle de lavande est généralement riche en linalool et en acétate de linalyle, responsables de ses propriétés relaxantes et aromatiques **(Lis-Balchin, 2002).**

- **Variabilité de la composition chimique**

La composition chimique des huiles essentielles du genre Lavandula varie considérablement selon les espèces, ainsi que selon plusieurs facteurs environnementaux tels que la température, l'altitude, la nature du sol, la période de récolte et la localisation géographique. Cette variabilité est également liée à une certaine instabilité génétique **(Lis-Balchin, 2002).**

Par exemple, l'huile essentielle de Lavandula latifolia (Spike lavender) se distingue par une teneur plus élevée en camphre, contrairement à Lavandula angustifolia, qui est plus riche en linalool et en acétate de linalyle **(Lis-Balchin, 2002).**

- **Comparaison interspécifique**

Le tableau 3 suivant présente une comparaison des principaux constituants chimiques des huiles essentielles chez différentes espèces de Lavandula.

Tableau III.2 : Principaux constituants chimiques des huiles essentielles (% du volume total) chez différentes espèces de Lavandula. . (Wells et al. 2018, cités par Batiha et al. 2023 ; adapté par l'étudiante 2026).

Constituants(%)	*L.angustifolia*	*L. latifolia*	*L. stoechas*	*L.intermedia* ×

Linaloo	6.97 – 44.4	27.0 – 61.1	0.08 – 2.7	21.1 – 32.3
Linalyl acetate	7.2 – 50.5	0.05 – 1.1	nd	3.04 – 46.0
Bornéol	0 – 6.2	0.16 – 5.9	0.8 – 1.4	0 – 15.7
1,8-Cinéole	0 - 6.03	6.6 – 34.9	8 – 52.7	5.2- 26.1
Camphor	0 – 1.7	1.1 – 46.7	7.9 – 51.6	2.5 – 11.1

III 5. Utilisations médicales de Lavandula

Le genre Lavandula est reconnu pour sa grande importance thérapeutique et sa diversité d'usages médicinaux. Il comprend environ 39 espèces, mais seule *Lavandula angustifolia* est officiellement utilisée comme matière première en pharmacopée en raison de ses propriétés pharmacologiques bien documentées **(Dobros et al., 2023)**. Traditionnellement, la lavande est employée dans le traitement des coliques, des affections respiratoires et des céphalées, tandis qu'actuellement son utilisation s'est élargie aux domaines de la cosmétique, de la parfumerie et de l'aromathérapie clinique **(Batiha et al., 2023)**.

Sur le plan neurologique, les extraits de Lavandula exercent des effets significatifs sur le système nerveux central. L'inhalation de son huile essentielle induit un effet relaxant via le système limbique et augmente l'activité des ondes alpha cérébrales, ce qui explique ses effets calmants. À l'échelle biochimique, elle agit sur les neurotransmetteurs en augmentant le GABA et en diminuant l'acétylcholine, contribuant ainsi à ses propriétés anxiolytiques et neuroprotectrices. Certaines études rapportent également des effets intéressants dans la modulation de la neurotoxicité et dans la protection contre les maladies neurodégénératives **(Batiha et al., 2023)**.

En parallèle, la lavande possède des propriétés analgésiques et anesthésiques dues principalement à ses constituants majeurs, le linalol et l'acétate de linalyle, capables de bloquer les canaux ioniques sodium et calcium. Ces effets expliquent son utilisation dans la réduction des douleurs post-partum ainsi que dans certaines douleurs chroniques, notamment la polyarthrite rhumatoïde **(Batiha et al., 2023)**. De plus, elle exerce une activité spasmolytique sur les muscles lisses, ce qui justifie son usage traditionnel dans les troubles digestifs **(Lis-Balchin, 2002)**.

Concernant les propriétés antimicrobiennes et antiparasitaires, les extraits de Lavandula montrent une activité inhibitrice contre plusieurs agents pathogènes, incluant certaines bactéries résistantes comme MRSA ainsi que des champignons pathogènes. Ils présentent également une efficacité contre des parasites tels que Giardia lamblia et Trichomonas vaginalis, avec des variations d'activité selon les espèces, la lavande « Spike » étant souvent la plus active **(Batiha et al., 2023 ; LisBalchin, 2002)**.

Enfin, en dermatologie, la lavande est utilisée pour traiter diverses affections cutanées telles que l'eczéma, le psoriasis et l'alopécie, tout en favorisant la cicatrisation des tissus. Elle présente également des effets antioxydants associés à l'augmentation du glutathion (GSH), ainsi que des actions métaboliques liées à l'inhibition de certaines enzymes impliquées dans le métabolisme lipidique **(Batiha et al., 2023)**.

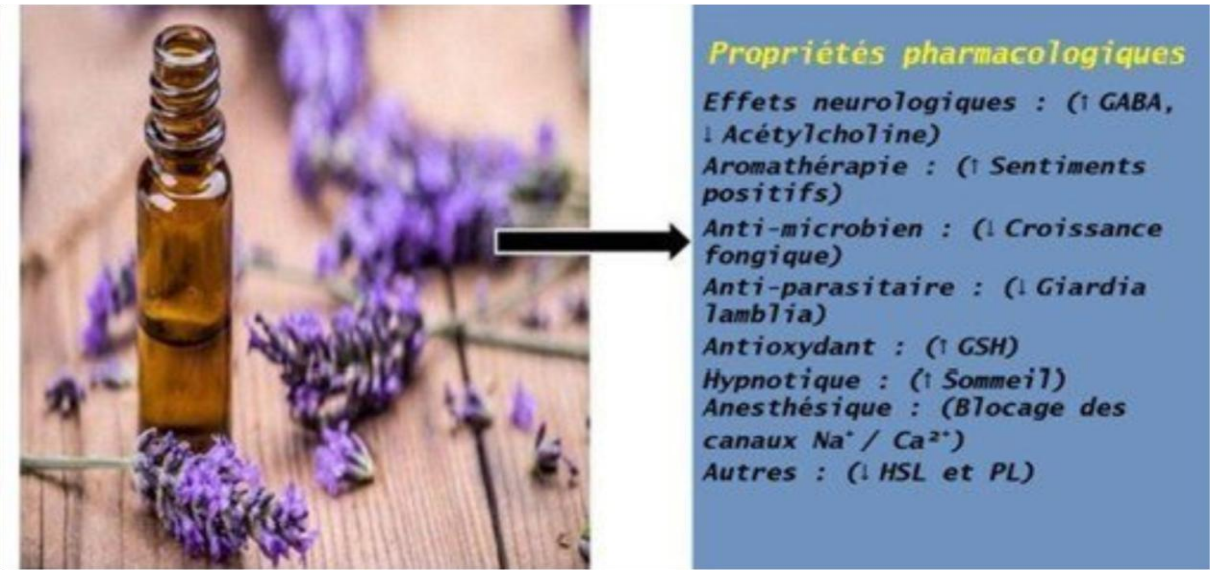


Figure III.6 : Mécanisme d'action de Lavandula sp. avec mise en évidence de ses effets pharmacologiques. (Adapté de Batiha et al., 2023).

III 6. Effet du stress hydrique sur le genre Lavandula

Les réponses au stress hydrique varient selon les espèces et les conditions expérimentales. Le stress hydrique constitue l'un des principaux facteurs abiotiques influençant la croissance, le métabolisme et la production d'huiles essentielles chez les espèces du genre Lavandula. La disponibilité en eau agit comme un facteur environnemental déterminant, capable d'induire des modifications significatives de la composition chimique ainsi que des réponses physiologiques des plantes **(Lis-Balchin, 2002)**.

- **Adaptations morphologiques**

La capacité d'adaptation du genre Lavandula aux conditions de déficit hydrique est en partie liée à la présence d'un tomentum (revêtement pileux) sur les feuilles. Cette structure agit comme une barrière physique limitant la transpiration excessive et protégeant les tissus végétaux contre l'insolation directe, contribuant ainsi à la tolérance à la sécheresse **(Batiha et al., 2023)**.

- **Effets sur la production d'huile essentielle**

Plusieurs études ont montré que le stress hydrique peut influencer le rendement en huile essentielle. Dans certaines conditions expérimentales, un stress modéré (réduction de l'irrigation) peut entraîner une augmentation de la production. Par exemple, une réduction de l'apport hydrique à 20 % de la capacité au champ a permis d'obtenir un rendement de 0,80 ml contre 0,30 ml en conditions normales **(Hosseini et al., 2025).** Cette augmentation est généralement attribuée à une activation du métabolisme secondaire sous stress.

- **Réponses physiologiques**

Le stress hydrique entraîne souvent une diminution des teneurs en chlorophylle (a et b), traduisant une perturbation de la photosynthèse. Cette réduction s'accompagne d'une réorientation du métabolisme vers la synthèse de métabolites secondaires, considérée comme une stratégie adaptative face aux conditions de déficit hydrique **(Hosseini et al., 2025).**

- **Exemple expérimental**

Une étude menée sur Lavandula angustifolia **(Du et Rennenberg, 2018**) a montré qu'un stress hydrique sévère provoque une diminution de l'hydratation foliaire et une augmentation du stress oxydatif, caractérisée par une élévation du H_2O_2. Ce phénomène s'accompagne d'une réduction des protéines solubles et d'une augmentation des acides aminés, traduisant un

Ajustement osmotique. Par ailleurs, la plante active des systèmes antioxydants (glutathion et ascorbate) afin de limiter les dommages cellulaires.

- **Effets sur les propriétés biologiques :**

Certaines études indiquent que les huiles essentielles issues de plantes soumises à un stress hydrique présentent une activité antibactérienne plus élevée, notamment contre Escherichia coli et Bacillus subtilis. Cette amélioration est liée aux modifications de la composition en composés volatils, en particulier les terpènes **(Hosseini et al., 2025).**

- **Capacité de récupération**

Après réhydratation, les espèces de Lavandula montrent une capacité de récupération progressive. Le rétablissement de l'équilibre hydrique intervient généralement entre 3 et 10 jours après la reprise de l'irrigation, accompagné d'une normalisation partielle des fonctions métaboliques **(Du et Rennenberg, 2018).**

Il convient de souligner que ces résultats concernent uniquement les espèces étudiées et ne peuvent être généralisés à l'ensemble du genre Lavandula.

II.3.2 Le romarin (*Rosmarinus officinalis* L)

III.**3.2.1 Classification de (*Rosmarinus officinalis* L)**

Tableau III.3 : Classification phylogénétique du romarin (*Rosmarinus officinalis* L.) selon le système APG (Akshay et al., 2019)

Nom Scientifique	**Rang Taxonomique**
Plantae	Règne
Tracheobionta	Sous-règne
Spermatophyta	Super-division
Magnoliophyta	Division
Magnoliopsida	Classe
Asteridae	Sous-classe
Lamiales	Ordre
Lamiaceae	Famille
Rosmarinus	Genre
Officinalis	Espèce
Rosmarinus officinalis L	Nom binomial



Figure III.7 : Morphologie de *Rosmarinus officinalis* L. (Akshay et al., 2019)

III.3.2.2 Description morphologique

Rosmarinus officinalis, ou romarin, est un arbuste vivace, toujours vert, dressé et fortement ramifié, pouvant atteindre environ 2 m de hauteur. La tige est subquadrangulaire et couverte d'une fine pubescence grisâtre.

Les feuilles sont opposées, sessiles ou à très court pétiole. Le limbe est linéaire (1–5 cm × 1–2 mm). La marge est révolutée, la face supérieure est vert foncé, luisante et presque glabre, tandis que la face inférieure est blanchâtre et tomenteuse. Les feuilles sont fortement aromatiques lorsqu'elles sont froissées.

Les inflorescences sont axillaires, racémeuses, portant 5 à 10 fleurs. Le calice est campanulé et bilabié, recouvert de poils étoilés. La corolle est tubulaire et bilabiée, de couleur bleu pâle ou blanche.

Les étamines sont au nombre de quatre : deux fertiles et deux réduites à des staminodes. Le pistil possède un ovaire profondément quadrilobé avec un style incurvé se terminant par un stigmate bifide.

Le fruit est formé de 4 petites nucules, lisses et glabres **(Andrade et al., 2018)**



Figure III.8 : Planche botanique de *R. officinalis (*Köhler, 1890)

3.2.3 La répartition géographique du romarin (*Rosmarinus officinalis*)

La répartition géographique du romarin (*Rosmarinus officinalis*) reflète une histoire complexe liée aux changements climatiques survenus durant les périodes glaciaires dans le bassin méditerranéen. Cette espèce est principalement concentrée dans la partie occidentale du bassin, où elle présente la plus forte densité et la plus grande diversité génétique, notamment dans l'est de la péninsule Ibérique, les îles Baléares et le sud-est de la France. Ces régions sont considérées comme d'anciens refuges glaciaires ayant contribué à la préservation de cette diversité.

En revanche, sa présence et sa diversité diminuent progressivement vers l'est, où elle devient plus rare en Méditerranée orientale, avec une quasi-absence dans certaines zones. Les données génétiques indiquent une expansion à partir de l'ouest vers d'autres régions, notamment vers le sud-ouest de la péninsule Ibérique et l'Afrique du Nord, avec une extension jusqu'à des zones éloignées comme la Cyrénaïque, ainsi qu'un autre axe de dispersion en Afrique du Nord d'ouest en est (**Mateu-Andrés et al., 2013).**

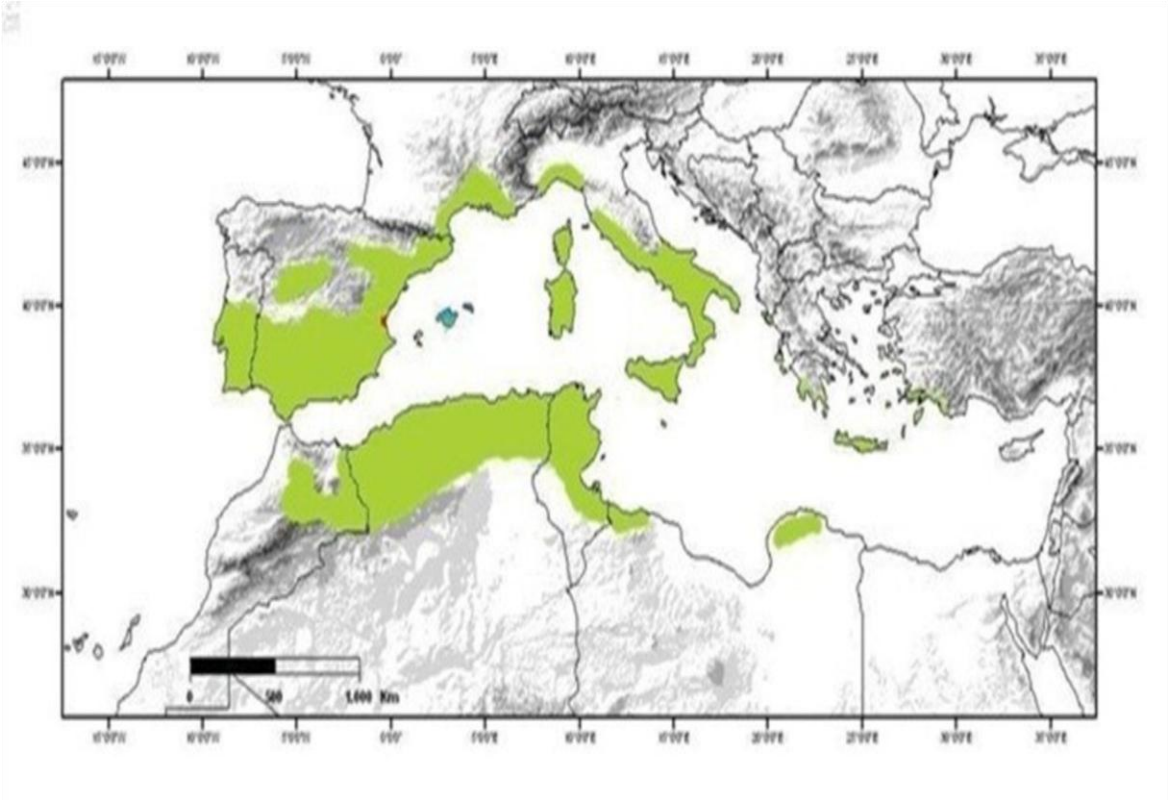


Figure III.9 : Répartition de *Rosmarinus officinalis L.* (Ferrer-Gallego et al., 2014)

III. 3.2.4 Composition chimique de *Rosmarinus officinalis*

Rosmarinus officinalis est composé de plusieurs groupes chimiques principaux, à savoir les composés phénoliques, les di- et triterpènes, ainsi que les huiles essentielles.

Les composés phénoliques comprennent principalement l'acide rosmarinique, l'acide caféique,l'acide carnosique et le carnosol. Les terpènes regroupent les di- et triterpènes tels que l'acide ursolique et l'acide bétulinique. Quant aux huiles essentielles, elles constituent un mélange complexe de composés volatils, principalement des monoterpènes et des sesquiterpènes, ainsi que d'autres composés aromatiques et dérivés. Cette huile contient des composés majeurs tels que le camphre, le 1,8-cinéole, l'α-pinène, le bornéol, le camphène, le β-pinène et le limonène. L'huile essentielle de romarin est obtenue par distillation à la vapeur des feuilles de la plante. Elle se présente sous une couleur allant de l'incolore au jaune pâle, possède une odeur caractéristique camphrée et est insoluble dans l'eau **(Akshay et al., 2019)**.

III.3.2.5 Usages et propriétés médicinales du romarin ;

Rosmarinus officinalis L. est une plante riche en composés phénoliques et en huiles essentielles, ce qui lui confère de multiples propriétés médicinales. Ses extraits présentent

une activité antioxydante grâce à des composés tels que l'acide rosmarinique et l'acide carnosique, capables de neutraliser les radicaux libres et de réduire le stress oxydatif. Elle possède également des effets anti-inflammatoires et antimicrobiens, en agissant sur les cytokines et la membrane cellulaire des microorganismes. De plus, elle contribue à l'amélioration de certaines fonctions physiologiques, notamment la santé cardiovasculaire, la régulation des lipides sanguins et la protection du foie et des reins. Au niveau du système nerveux, le romarin présente des effets anxiolytiques et antalgiques. Il est aussi utilisé dans l'industrie alimentaire comme conservateur naturel grâce à sa capacité à retarder l'oxydation des lipides. Ces effets sont liés à l'action synergique des composés phénoliques et des huiles essentielles, faisant de *Rosmarinus officinalis* L. une plante d'intérêt médical et nutritionnel**.(de Oliveira et al., 2019; Nieto et al., 2018)**

III.3.2.6 Effet de stress hydrique sur *Rosmarinus officinalis*

III. 3.2.6.1. Effets morphologiques

Le stress hydrique entraîne une réduction de la croissance du romarin (*Rosmarinus officinalis*), caractérisée par une diminution de la longueur de la tige, de la biomasse et de la surface foliaire, en raison d'une réduction de la division et de l'élongation cellulaires. L'absorption de l'eau et des éléments minéraux diminue également, ce qui limite le développement des organes aériens. En revanche, une augmentation de la croissance des racines peut être observée comme réponse adaptative visant à améliorer l'absorption de l'eau dans le sol **(Bidgoli, 2018)**.

III.3.2.6.2. Effets biochimiques (métaboliques)

Le stress hydrique influence la composition des métabolites secondaires, en particulier les terpènes constituant l'huile essentielle. Les proportions de monoterpènes et de sesquiterpènes varient selon l'intensité et la durée de la sécheresse. Dans certains cas, une diminution de la teneur en huile essentielle est observée, tandis qu'un stress modéré peut entraîner une augmentation temporaire de certains composés défensifs tels que l'α-pinène et le 1,8-cinéole.Par ailleurs, la sécheresse stimule la production de composés phénoliques et de flavonoïdes, ainsi que l'activité des antioxydants, comme mécanisme de défense contre le stress oxydatif **(Darwish et al., 2025)**.

III.3.2.6.3. Effets anatomiques et cellulaires

Le stress hydrique induit des modifications anatomiques chez le romarin, notamment l'épaississement de la cuticule (couche cireuse) et l'augmentation de la rigidité des tissus, ce qui constitue des adaptations réduisant les pertes en eau. Au niveau cellulaire, on

observe l'accumulation de structures telles que les plastoglobules et les corps lipidiques, contribuant à la protection et à la stabilité des cellules dans des conditions de stress **(Olmos et al., 2007)**.

III.3.3 Importance des plantes médicinales en Algérie

Les plantes médicinales occupent une place essentielle dans la médecine traditionnelle en Algérie, où elles sont utilisées depuis des siècles pour le traitement et la prévention de nombreuses pathologies. Cette utilisation repose sur un savoir empirique transmis de génération en génération, constituant un patrimoine culturel et thérapeutique important. Selon certaines estimations, près de 80 % des populations africaines ont recours à la médecine traditionnelle pour assurer leurs soins de santé primaires, ce qui souligne l'importance des ressources végétales en raison de leur accessibilité, de leur coût relativement faible et de leur efficacité perçue **(Benarba, 2016)**.

Par ailleurs, l'Algérie se caractérise par une richesse floristique remarquable, avec plus de 3164 espèces végétales recensées. Cette biodiversité représente une source considérable de molécules bioactives utilisées dans les domaines pharmaceutique, cosmétique et agroalimentaire. Ainsi, les plantes médicinales constituent un potentiel économique et scientifique important, notamment dans le cadre du développement de nouveaux médicaments à base de substances naturelles **(Benarba, 2016)**.

III.3.3.1 Conditions climatiques

Les conditions climatiques en Algérie, dominées par des zones arides et semiarides, jouent un rôle déterminant dans la distribution géographique ainsi que dans la composition chimique des plantes médicinales. Parmi les facteurs environnementaux, le stress hydrique constitue l'un des éléments les plus influents sur le développement des plantes et la production de leurs métabolites secondaires.

Le déficit hydrique entraîne des perturbations importantes des processus physiologiques fondamentaux tels que la photosynthèse, la régulation osmotique et l'activité enzymatique. En effet, la réduction de la disponibilité en eau limite l'ouverture stomatique, ce qui diminue les échanges gazeux et affecte la production de biomasse. Par ailleurs, ce stress favorise l'accumulation d'espèces réactives de l'oxygène (ROS), responsables du stress oxydatif et pouvant provoquer des dommages au niveau cellulaire **(Wahab et al., 2022)**.

Face à ces contraintes, les plantes développent des mécanismes d'adaptation complexes afin de maintenir leur équilibre interne. Ces réponses incluent notamment

l'accumulation d'osmolytes, tels que les sucres solubles et certaines protéines, ainsi que l'activation de systèmes de défense antioxydants permettant de neutraliser les ROS. De plus, le stress hydrique peut influencer la synthèse de composés phénoliques et d'autres métabolites secondaires, contribuant ainsi à modifier la qualité et la concentration des principes actifs des plantes médicinales **(Hequaqui et al., 2023)**.

Ainsi, les variations climatiques apparaissent comme un facteur clé influençant non seulement la croissance des plantes, mais également leurs propriétés thérapeutiques.

III.3.3.2 Adaptation de la région à la culture des plantes aromatiques

Les plantes aromatiques et médicinales cultivées en Algérie, notamment dans les régions sahariennes et méditerranéennes, présentent une grande capacité d'adaptation aux conditions environnementales contraignantes, en particulier la sécheresse et les températures élevées. Cette capacité repose sur la mise en place de stratégies morphologiques, physiologiques et biochimiques leur permettant de survivre et de maintenir leur activité métabolique.

Sur le plan morphologique, ces plantes peuvent réduire leur surface foliaire afin de limiter les pertes en eau par transpiration. Sur le plan physiologique, elles régulent l'ouverture des stomates pour contrôler les échanges gazeux et préserver leur statut hydrique. Par ailleurs, au niveau biochimique, elles accumulent des osmoprotecteurs et activent des enzymes antioxydantes afin de protéger les structures cellulaires contre les effets du stress oxydatif.

En outre, il a été démontré que le stress hydrique peut, dans certains cas, stimuler la biosynthèse des métabolites secondaires, notamment les composés phénoliques et les huiles essentielles. Cette augmentation contribue à renforcer les propriétés thérapeutiques et la valeur économique des plantes aromatiques et médicinales. Ainsi, ces adaptations confèrent à ces espèces un intérêt particulier pour leur valorisation dans les domaines médicinal et industriel **(Herpani et al., 2023 ; Wahab et al., 2022 ; Wazazi et al., 2023)**.

Chapitre IV : Matériel et méthodes

CHAPITRE IV : Matériel et méthodes

IV.1. Présentation du matériel végétal

Le matériel végétal utilisé dans cette étude est constitué de deux plantes médicinales et aromatiques appartenant à la famille des Lamiacées (Lamiaceae) : la lavande (*Lavandula* sp.) et le romarin (*Rosmarinus* sp.). Ces espèces ont été sélectionnées en raison de leur intérêt médicinal, de leur richesse en métabolites secondaires bioactifs, ainsi que de leur importance économique et thérapeutique.

Les plants ont été acquis auprès d'un fournisseur spécialisé, puis transférés à la serre du Département des Sciences Agronomiques de l'Université 20 Août 1955 de Skikda, où l'expérimentation a été conduite sous des conditions contrôlées.

Au total, 180 plants ont été mobilisés pour cette étude, répartis en 90 plants de lavande et 90 plants de romarin. Après leur transplantation dans des sachets en plastique contenant le substrat de culture, les plantes ont été soumises à différentes conditions hydriques afin d'évaluer l'impact du stress hydrique sur la composition phytochimique et la biosynthèse des métabolites bioactifs.



Figure IV.1 : Romarin (Photo personnelle).



Figure IV.2 : Lavande (Photo personnelle).

IV.2. Mise en place de l'expérimentation

IV.2.1. Matériel végétal

- Romarin (*Rosmarinus* sp.)
- Lavande (*Lavandula* sp.)

L'expérimentation a été réalisée sous serre au sein de l'Université 20 Août 1955 de Skikda. Elle s'est déroulée sur une période s'étalant du mois de février jusqu'au 07 mai.

Le dispositif expérimental a porté sur deux espèces de plantes médicinales : la lavande (*Lavandula* sp.) et le romarin (*Rosmarinus* sp.). Au total, 180 plants ont été utilisés, répartis de manière équitable entre les deux espèces étudiées, soit 90 plants de lavande et 90 plants de romarin.

Les plants ont été cultivés dans des sachets en plastique et soumis à différents régimes d'alimentation hydrique, dans le but d'évaluer l'impact du stress hydrique sur la composition phytochimique et la biosynthèse des métabolites bioactifs.

IV.2.2. Répartition des plants expérimentaux

Après leur installation sous serre, les plants ont été répartis selon le dispositif expérimental adopté. Chaque espèce a été subdivisée en trois lots distincts, correspondant aux différents niveaux d'irrigation appliqués tout au long de l'étude. Cette répartition a permis de comparer les réponses physiologiques des plantes face à

diverses conditions hydriques et d'évaluer l'effet du stress hydrique sur les paramètres phytochimiques ciblés.

Tableau IV.1 : Répartition des plants selon les traitements hydriques.

Espèce	**25 %**	**50 %**	**100 %**	**Total**
Lavandula sp.	30	30	30	90
Rosmarinus sp.	30	30	30	90
Total	**60**	**60**	**60**	**180**

IV.2.3. Application du stress hydrique

Le stress hydrique a été appliqué aux plants de lavande (*Lavandula* sp.) et de romarin (*Rosmarinus* sp.) durant la période d'expérimentation, du mois de février au 07 mai. Les végétaux ont été répartis en trois traitements hydriques correspondant à différents niveaux d'apport en eau. Au début de l'expérimentation, les plants soumis au traitement T1 (25 %) ont été irrigués une fois par semaine, ceux du traitement T2 (50 %) deux fois par semaine, tandis que les plants du traitement témoin T3 (100 %) ont bénéficié de trois arrosages hebdomadaires.

Face à l'augmentation progressive des températures au cours de l'essai, la fréquence d'irrigation a été réajustée afin de maintenir constants les niveaux de stress hydrique préalablement définis. Ainsi, jusqu'à la fin de l'expérimentation, les plants du traitement T1 ont été arrosés deux fois par semaine, ceux du traitement T2 trois fois par semaine, et ceux du traitement T3 quatre fois par semaine.

IV.2.4. Récolte et préparation du matériel végétal

À l'issue de l'expérimentation, le 07 mai, les parties aériennes des plants de lavande (*Lavandula* sp.) et de romarin (*Rosmarinus* sp.) ont été récoltées en vue des différentes analyses inhérentes à cette étude. Immédiatement après la récolte, le matériel végétal a été rincé à l'eau distillée puis séché superficiellement afin d'éliminer l'excès d'humidité.



Figure IV.3 : Récolte, lavage et séchage du matériel végétal (Photos personnelles).

Les feuilles ont ensuite été séparées des tiges et disposées à l'air libre dans un local sombre et bien ventilé, jusqu'à l'obtention d'une dessiccation complète. Une fraction des feuilles fraîches a été immédiatement exploitée pour la quantification de la teneur en chlorophylles, tandis que la biomasse foliaire séchée a été réservée à l'extraction des huiles essentielles et à la préparation des extraits destinés aux dosages phytochimiques.



Figure IV.4 : Séchage des feuilles de *R. officinalis* et de *Lavandula* sp. (Photos personnelles).

Après séchage, le matériel végétal a été broyé à l'aide d'un moulin électrique de laboratoire afin d'obtenir une poudre fine et homogène. Les broyats ainsi obtenus ont été conditionnés dans des flacons en verre hermétiquement clos et conservés à température ambiante jusqu'à leur utilisation pour les analyses ultérieures.

IV.3. Réactifs chimiques

- Éthanol à 70 %.
- Acétone à 80 %.
- Réactif de Folin-Ciocalteu.
- Carbonate de sodium (Na_2CO_3) à 7,5 %.
- Chlorure d'aluminium ($AlCl_3$) à 2 %.
- Vanilline à 1 %.
- Acide chlorhydrique (HCl).
- Acide gallique.
- Quercétine.
- Catéchine.
- Sulfate de sodium anhydre.
- Eau distillée.

IV.4. Matériel et appareillage de laboratoire

- Spectrophotomètre UV-visible.
- Appareillage d'hydrodistillation de type Clevenger.
- Balance analytique de précision.
- Broyeur électrique.
- Agitateur magnétique.
- Ballon en verre (capacité 1 L).
- Réfrigérant à eau.
- Micropipettes de précision et cônes.
- Tubes à essai.
- Fioles jaugées.
- Béchers et verrerie de laboratoire courante.

IV.5. Méthodes d'analyse

IV.5.1. Méthodes d'étude

Les travaux expérimentaux et analytiques ont été réalisés au sein du laboratoire du Département des Sciences Agronomiques de l'Université 20 Août 1955 de Skikda. Cette phase analytique visait à évaluer l'impact du stress hydrique sur plusieurs paramètres physiologiques et phytochimiques chez la lavande (*Lavandula* sp.) et le romarin (*Rosmarinus* sp.), à savoir : la teneur foliaire en chlorophylles, le rendement en huiles essentielles, l'accumulation en composés phénoliques totaux, en flavonoïdes et en tanins, ainsi que l'évaluation de l'activité antioxydante des extraits obtenus.

IV.5.2. Détermination de la teneur en chlorophylles

La quantification des pigments chlorophylliens a été réalisée suite à leur extraction par l'acétone à 80 %, selon le protocole décrit par Arnon (1949). Cette analyse a été effectuée sur les deux espèces étudiées, le romarin (*Rosmarinus officinalis*) et la lavande (*Lavandula* sp.), préalablement soumises aux trois régimes hydriques (100 %, 50 % et 25 % de la capacité au champ).Un échantillon de 3 g de feuilles fraîches a été finement broyé en présence de 20 mL d'acétone. L'homogénat obtenu a ensuite été ajusté avec le solvant d'extraction jusqu'à atteindre un volume final de 12 mL. L'extrait brut a été filtré afin de récupérer une solution pigmentaire limpide. L'absorbance des extraits a été mesurée au spectrophotomètre aux longueurs d'onde spécifiques de 663 nm pour la chlorophylle *a* et de 645 nm pour la chlorophylle *b*.

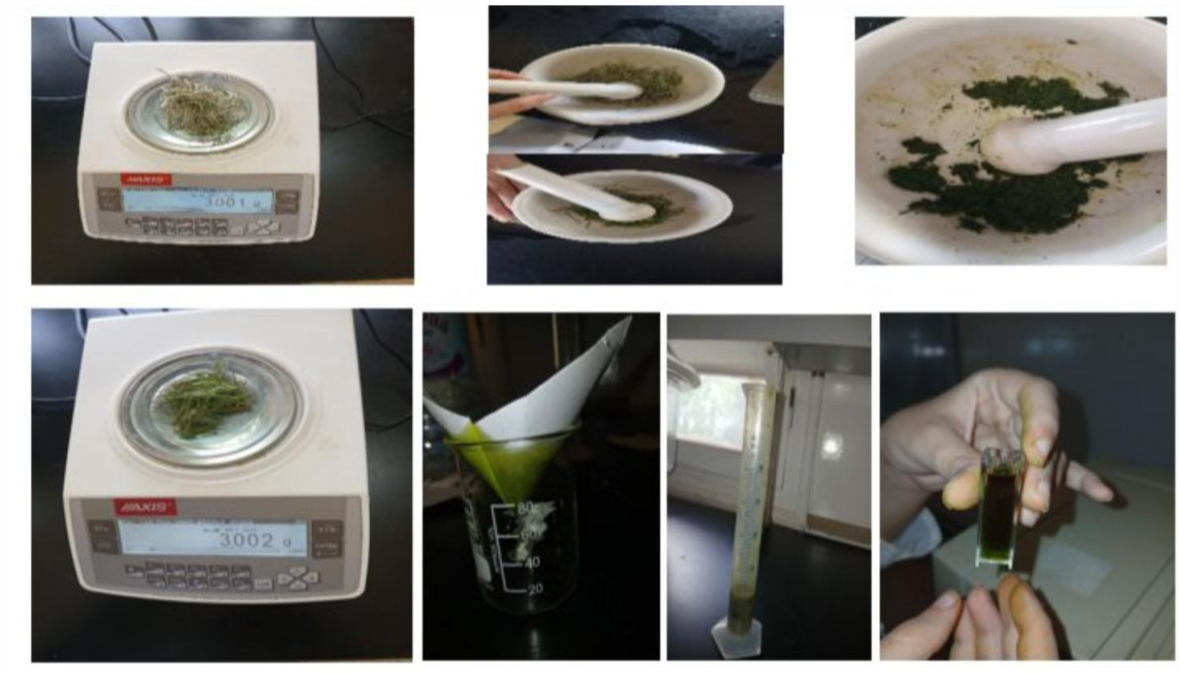


Figure IV.5 : Étapes de détermination de la teneur en chlorophylles (Photos personnelles).

- **Calcul de la teneur en chlorophylle**

Les concentrations en pigments photosynthétiques ont été calculées à l'aide des équations suivantes :

$$\textbf{Chlorophylle a (mg/L)} = 12{,}41 \times DO_{663} - 2{,}59 \times DO_{645}$$

$$\textbf{Chlorophylle b (mg/L)} = 22{,}9 \times DO_{645} - 4{,}68 \times DO_{663}$$

$$\textbf{Chlorophylle totale} = \textbf{Chlorophylle a} + \textbf{Chlorophylle b}$$

IV.5.3. Extraction des huiles essentielles (HE)

L'extraction des huiles essentielles a été réalisée par hydrodistillation au moyen d'un montage de type Clevenger, conformément à la méthode officielle préconisée par la Pharmacopée européenne (5e édition, Conseil de l'Europe, 1997). L'ensemble des manipulations a été conduit au laboratoire de chimie du Département des Sciences Agronomiques de l'Université 20 Août 1955 de Skikda (Figure 20).



Figure IV.6 : Montage d'extraction des huiles essentielles par hydrodistillation de type Clevenger (Photos personnelles).

Pour ce faire, une prise d'essai de 40 g de feuilles fraîches de romarin (*Rosmarinus officinalis*) et de lavande (*Lavandula* sp.) a été immergée, pour chaque espèce, dans un ballon d'un litre contenant 700 mL d'eau distillée. Le mélange hétérogène a été porté à ébullition au moyen d'un chauffe-ballon pour une durée d'extraction de 3 heures. Sous l'effet de la chaleur, les vapeurs chargées en principes volatils traversent le réfrigérant où elles se condensent. Le distillat s'accumule dans la burette de décantation préalablement remplie d'eau distillée. En raison de sa plus faible

densité, l'huile essentielle migre et surnage à la surface de l'hydrolat, avant d'être délicatement récupérée.

IV.5.4. Préparation des extraits éthanoïques

Le protocole d'extraction a été adapté des travaux de Romani et al. (2006) avec de légères modifications. Un échantillon de 55 g de poudre foliaire sèche de romarin (*Rosmarinus officinalis*) et de lavande (*Lavandula* sp.) a été soumis à une macération dans un mélange hydroéthanolique (éthanol/eau, 80/20, v/v).

Le macérât a ensuite été filtré sur papier filtre de type Whatman n° 1. Cette opération d'épuisement a été répétée à trois reprises, en renouvelant le solvant d'extraction à chaque cycle. Enfin, le solvant a été éliminé du filtrat par évaporation sous vide à l'aide d'un évaporateur rotatif **(Rota Vapor, Büchi R-200, Allemagne)**
température de 50°C.



Figure IV.7 : Dispositif d'évaporation du solvant à l'aide d'un évaporateur rotatif (Photos personnelles).

Suite à l'évaporation sous pression réduite, l'extrait brut a été placé dans une étuve ventilée et thermostatée à 40 °C jusqu'à siccité totale, garantissant l'élimination de toute trace résiduelle de solvant. Une solution mère a ensuite été préparée en reprenant une masse exacte de 2 g d'extrait sec dans un volume de 172 mL d'éthanol à 80 % (v/v). Le mélange a été vigoureusement agité pour obtenir une dissolution totale,

correspondant à une concentration finale de 11,63 mg/mL. Cette solution a été stockée à l'obscurité, à une température de 4 °C, dans l'attente des analyses biochimiques.

IV.5.5. Calcul du rendement en composés phénoliques de l'extrait éthanolique

Le rendement de l'extraction éthanolique correspond au rapport entre la masse de l'extrait sec obtenu et la masse de la poudre végétale initiale soumise à l'extraction **(Cheurfa et al., 2013).** Ce rendement s'exprime en pourcentage et se calcule selon la formule suivante :

$$R\,(\%) = \frac{P_s}{P_p} \times 100$$

Où :

- **R :** Rendement de l'extraction (%).
- **Ps :** Poids de l'extrait sec obtenu (g).
- **Pp :** Poids de la poudre végétale utilisée (g).

IV.5.6. Dosage des composés phénoliques totaux

La teneur en composés phénoliques totaux a été évaluée par la méthode colorimétrique de Folin-Ciocalteu. Un volume de 300 µL d'extrait a été additionné de 1,5 mL du réactif de Folin-Ciocalteu et de 1,2 mL d'une solution aqueuse de carbonate de sodium (Na_2CO_3) à 7,5 %. Après une période d'incubation de deux heures à l'obscurité, l'absorbance du mélange réactionnel a été mesurée au spectrophotomètre à une longueur d'onde de 750 nm. La quantification a été déterminée par extrapolation sur une courbe d'étalonnage préalablement établie avec de l'acide gallique. Les résultats sont exprimés en milligrammes d'équivalent d'acide gallique par gramme d'extrait sec (mg EAG/g ES).

IV.5.7. Dosage des flavonoïdes totaux

L'estimation quantitative des flavonoïdes totaux a été réalisée selon le protocole colorimétrique décrit par Chang et al. (2002). Une aliquote de 500 µL d'extrait a été mélangée à 500 µL d'une solution de chlorure d'aluminium ($AlCl_3$) à 2 %. Après un temps d'incubation de 10 minutes à température ambiante, l'absorbance a été lue à 430 nm. Les teneurs ont été calculées en se référant à une courbe de calibration réalisée avec de la quercétine pure. Les résultats sont exprimés en milligrammes d'équivalent de quercétine par gramme d'extrait sec (mg EQ/g ES).

IV.5.8. Dosage des tanins

La détermination de la teneur en tanins condensés a été effectuée en se basant sur la méthode à la vanilline chlorhydrique de Price et al. (1978). Le milieu réactionnel a été préparé en mélangeant 1 mL d'extrait avec 2,5 mL d'une solution de vanilline à 1 % et 2,5 mL d'acide chlorhydrique concentré. Après une incubation de 15 minutes au bainmarie réglé à 30 °C, l'absorbance a été mesurée à 500 nm. Les résultats ont été exprimés en milligrammes équivalents d'acide tannique (mg EAT/g d'extrait sec), en utilisant une courbe d'étalonnage de l'acide tannique.

Chapitre V : Résultats et discussion

CHAPITRE V : Résultats et discussion

V.1. Effet du stress hydrique sur la teneur en chlorophylle totale

Les analyses quantitatives de la concentration en pigments photosynthétiques révèlent que l'application d'un déficit hydrique contrôlé induit une altération significative et dose-dépendante du contenu en chlorophylle totale chez les deux espèces étudiées, le romarin (*Rosmarinus officinalis*) et la lavande (*Lavandula* sp.).

Les données expérimentales indiquent que les plantes témoins, maintenues sous un régime d'irrigation optimal à 100 % de la capacité au champ, affichent les concentrations de pigments les plus élevées. Ces valeurs culminent à 103,13 mg/L pour le romarin et à 96,33 mg/L pour la lavande, traduisant une intégrité fonctionnelle parfaite de l'appareil photosynthétique en l'absence de contrainte hydrique. En revanche, l'imposition d'un stress hydrique modéré (lot irrigué à 50 %) provoque une chute notable et statistiquement significative de la teneur en chlorophylle totale, qui s'abaisse respectivement à 78,26 mg/L chez le romarin et à 72,44 mg/L chez la lavande.

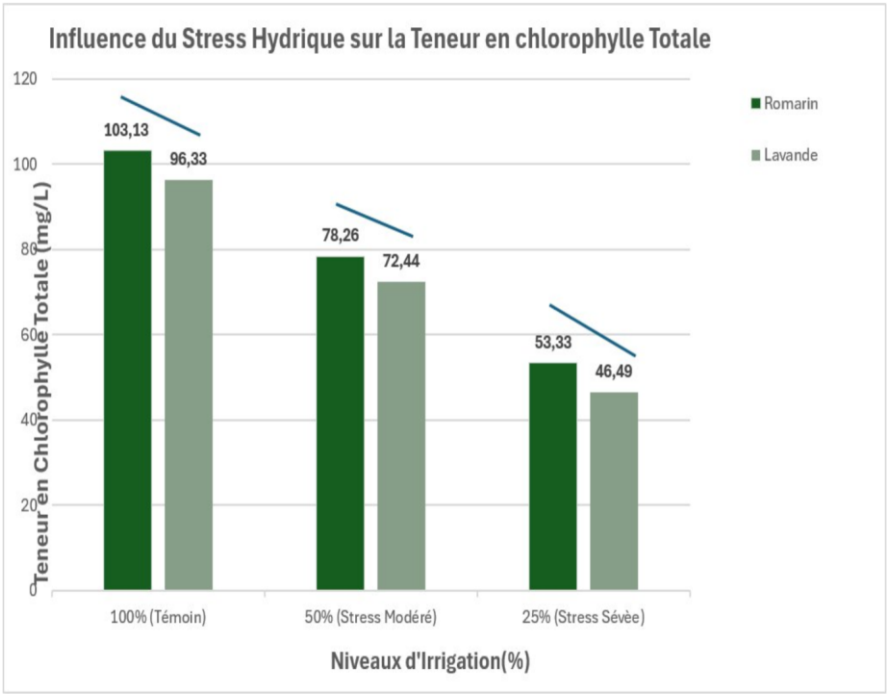


Figure V.1 : Influence du stress hydrique sur la teneur en chlorophylle totale chez le romarin (*Rosmarinus officinalis*) et la lavande (*Lavandula* sp.).

Cette tendance à la baisse s'exacerbe de manière critique sous l'effet d'un stress hydrique sévère (lot soumis à un régime d'irrigation à 25 %). Dans ces conditions de sécheresse extrême, les teneurs résiduelles en chlorophylle totale s'effondrent pour atteindre 53,33 mg/L chez le romarin et 46,49 mg/L chez la lavande. L'ensemble de ces

résultats met en évidence une corrélation inverse rigoureuse entre l'intensité du déficit en eau et la concentration globale en pigments photosynthétiques. L'aggravation progressive du stress hydrique accélère ainsi la déplétion des chlorophylles au sein des tissus foliaires.

Sur le plan physiologique, cette baisse drastique peut être explicitée par une cascade de mécanismes adaptatifs et délétères concomitants. En premier lieu, la diminution de la disponibilité en eau dans la rhizosphère induit une fermeture hydro-active des stomates, pilotée par la synthèse d'acide abscissique (ABA). Si cette réponse limite efficacement la perte d'eau par évapotranspiration, elle restreint drastiquement la conductance stomatique et, par conséquent, la diffusion du dioxyde de carbone (CO_2) vers le stroma des chloroplastes. Cette carence intracellulaire en carbone altère le fonctionnement du cycle de Calvin et ralentit l'activité de la Rubisco.

En second lieu, la restriction de l'assimilation du CO_2 engendre un surplus d'énergie lumineuse excitée au sein des photosystèmes (PS I et PS II) qui ne peut plus être canalisé par la voie métabolique primaire. Ce déséquilibre de la chaîne de transport des électrons favorise le transfert direct de l'énergie vers les molécules de dioxygène, déclenchant une surproduction intra-organite d'espèces réactives de l'oxygène (ROS), telles que l'anion superoxyde, le peroxyde d’hydrogène et le radical hydroxyle. Ces radicaux libres provoquent un stress oxydatif sévère, induisant la peroxydation lipidique des membranes thylakoïdiennes et stimulant l'activité des enzymes de dégradation, notamment la chlorophyllase, tout en inhibant la biosynthèse *de novo* des protéines structurales du complexe collecteur de lumière (LHCII).

Par ailleurs, une analyse comparative interspécifique démontre que le romarin préserve des concentrations de chlorophylle totale systématiquement supérieures à celles de la lavande, quel que soit le niveau de contrainte hydrique appliqué. Cette divergence chémotaxonomique et physiologique suggère fortement une plasticité adaptative et une tolérance cellulaire supérieures chez *Rosmarinus officinalis* face au déficit hydrique. Cette résilience accrue est vraisemblablement corrélée à des caractéristiques morpho-anatomiques protectrices propres au romarin (telles que des feuilles révolutées, une cuticule cireuse plus épaisse et une densité de trichomes protecteurs optimisée), qui concourent au maintien d'un potentiel hydrique foliaire favorable et prémunissent l'appareil photosynthétique contre la photo-oxydation.

Ces observations s'inscrivent en parfaite adéquation avec les travaux de Darwish et al. (2026). Ces auteurs ont mis en évidence une diminution progressive et linéaire de la teneur en chlorophylle totale sous l'effet d'une sécheresse induite chez le romarin,

attribuant formellement cette réduction à la synergie délétère entre l'inhibition métabolique de la machinerie photosynthétique et les dommages oxydatifs infligés par les ROS aux structures chloroplastiques.

V.2. Effet du stress hydrique sur la production des huiles essentielles

L'extraction par hydrodistillation des fractions volatiles des deux Lamiacées cultivées dans les conditions environnementales contrôlées de la région de Skikda a révélé des fluctuations qualitatives et quantitatives majeures de la production apparente des huiles essentielles en réponse aux différents régimes d'irrigation.

Chez les individus appartenant au lot témoin (irrigués à 100 %), seule une pellicule huileuse extrêmement ténue et discontinue a pu être observée à la surface du distillat au niveau de l'appareil de Clevenger. Compte tenu de la masse restreinte de biomasse fraîche engagée dans le ballon d'extraction (40 g), le volume recueilli s'est avéré inférieur au seuil de sensibilité de la verrerie graduée et a été consigné sous forme de traces non quantifiables.

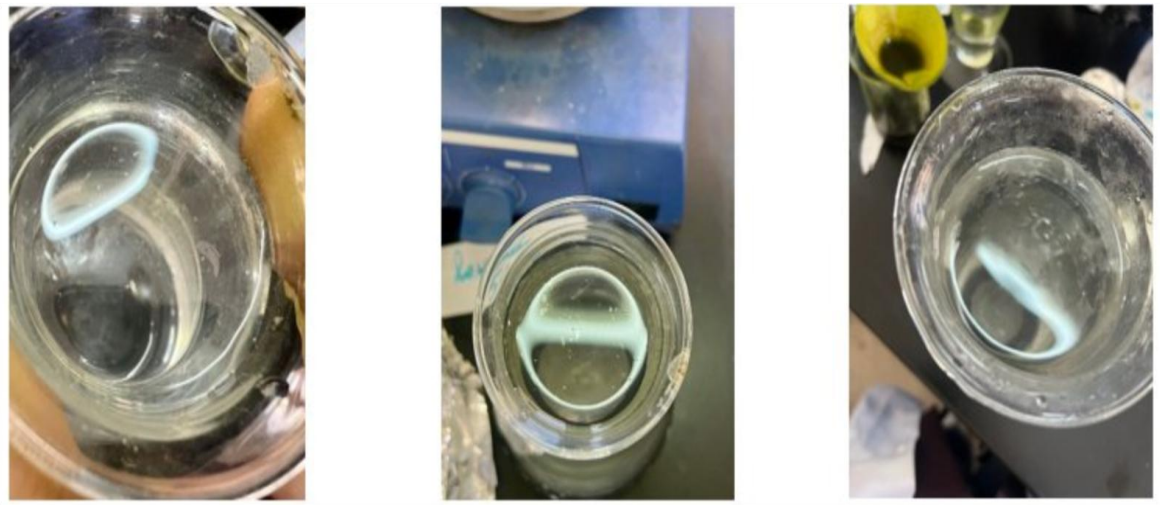


Figure V.2 : Aspect de la couche d'huile essentielle de romarin et de lavande obtenue sous différents niveaux d'irrigation (50 %, 25 % et 100 %) (Photos personnelles).

Sous l'effet d'un stress hydrique modéré (traitement à 50 %), une augmentation visuellement manifeste et hautement significative de l'épaisseur de la couche d'huile essentielle condensée a été enregistrée chez les deux taxons par rapport aux échantillons témoins. Cette stimulation de la production s'interprète comme une réponse métabolique adaptative active face au signal de déficit hydrique. L'application d'une contrainte modérée agit en effet comme un éliciteur abiotique capable de reprogrammer le métabolisme spécialisé (ou métabolisme secondaire) du végétal. Ce phénomène stimule les voies de biosynthèse des isoprénoïdes, notamment la voie cytosolique du mévalonate (MVA) et la

voie plastidiale du méthylérythritol phosphate (MEP). Il en résulte une surexpression des gènes codant pour des enzymes clés, telles que la DXS (1désoxy-D-xylulose-5-phosphate synthase) et les terpènes synthases (TPS), induisant une accumulation accrue de monoterpènes et de sesquiterpènes volatils au sein des structures sécrétrices. Ces composés hydrophobes exercent des rôles protecteurs cruciaux, agissant comme des agents antioxydants directs pour neutraliser les ROS ou modifiant la perméabilité membranaire pour limiter la déshydratation cellulaire.

À l'inverse, le lot soumis à un stress hydrique sévère (traitement à 25 %) s'est caractérisé par une absence totale de couche huileuse décelable à l'issue des 3 heures d'hydrodistillation. Ce tarissement complet de la production d'essences volatiles témoigne des répercussions physiopathologiques délétères d'un déficit hydrique excessif et prolongé sur l'organisme végétal. Lorsque la sécheresse atteint un seuil critique, la fermeture prolongée des stomates induit un effondrement de l'assimilation nette de carbone. Cette privation énergétique stricte limite drastiquement la disponibilité des assimilats carbonés issus de la photosynthèse, entraînant une compétition intra-organismique sévère pour le carbone disponible. Ce dernier est alors préférentiellement alloué aux fonctions de survie basale et à la maintenance respiratoire, au détriment des voies énergivores du métabolisme secondaire. De surcroît, un stress hydrique de cette intensité induit une dégradation ultrastructurale des sites de stockage, provoquant la lyse des trichomes glandulaires peltés et capités et des canaux sécréteurs, ce qui entraîne la volatilisation précoce ou la dégradation in situ des fractions aromatiques synthétisées.

L'ensemble de ces observations met en lumière le caractère biphasique de la réponse des Lamiacées au stress hydrique : une sécheresse modérée stimule la biosynthèse et l'accumulation des huiles essentielles, tandis qu'une carence hydrique exacerbée exerce une inhibition métabolique totale. Ces résultats valident l'existence d'un seuil de contrainte hydrique optimal permettant d'optimiser le rendement en métabolites secondaires volatils chez le romarin et la lavande sans compromettre la viabilité des tissus. Nos conclusions se révèlent en parfaite concordance avec les observations scientifiques publiées par Formica et al. (2024) chez le romarin (*Salvia rosmarinus*). Leurs investigations ont validé une recrudescence de la synthèse des huiles essentielles lors de l'application d'un stress hydrique modéré, suivie d'un déclin drastique du rendement dès lors que la contrainte devenait sévère. Ces auteurs expliquent que la phase de stimulation traduit une surrégulation adaptative des voies des terpénoïdes visant à contrecarrer les perturbations climatiques et à renforcer la fitness de la plante. À l'opposé, la dépression de la synthèse

observée sous contrainte sévère découle de la désorganisation globale des processus physiologiques fondamentaux (effondrement de la photosynthèse, sénescence précoce, blocage enzymatique), privant le végétal des précurseurs carbonés (acétyl-CoA, pyruvate) essentiels à la synthèse des molécules aromatiques.

V.3. Composés phénoliques

V.3.1. Calcul du rendement d'extraction

Les rendements quantitatifs des extraits hydroéthanoliques (éthanol/eau, 80/20, v/v) obtenus à partir de la biomasse foliaire séchée du romarin (*Rosmarinus* sp.) et de la lavande (*Lavandula* sp.) ont été calculés et reportés dans le tableau ci-dessous en fonction des différents régimes d'irrigation appliqués.

Tableau V.1 : Rendement de l'extraction hydroéthanolique (%) des feuilles de romarin et de lavande sous différents traitements hydriques.

Espèce	Régime d'irrigation : 100 %	Régime d'irrigation : 50 %	Régime d'irrigation : 25 %
Romarin (*Rosmarinus* sp.)	17,27 %	15,82 %	14,62 %
Lavande (*Lavandula* sp.)	14,29 %	12,785 %	11,88 %

Les données synthétisées dans le **Tableau 6** mettent en évidence une diminution progressive et linéaire du rendement global de l'extraction hydroéthanolique à mesure que l'intensité du stress hydrique s'accentue, et ce, chez les deux taxons végétaux investigués. Pour le romarin, le rendement s'abaisse de 17,27 % chez les témoins (100 %) à 15,82 % sous stress modéré (50 %), pour atteindre sa valeur minimale de 14,62 % sous stress sévère (25 %). Une cinétique parfaitement analogue est observée chez la lavande, avec des rendements d'extraction s'élevant respectivement à 14,29 %, 12,785 % et 11,88 % pour les traitements à 100 %, 50 % et 25 % d'irrigation.

Cette baisse continue du rendement global en extrait sec peut être expliquée par l'impact direct du déficit hydrique sur la balance métabolique globale de la plante. Le stress hydrique restreint la productivité primaire et inhibe l'élongation ainsi que la division cellulaire, ce qui conduit à une réduction globale de la biosynthèse des macromolécules

constitutives de la biomasse végétale extractible par les solvants polaires (tels que les sucres solubles, les acides aminés libres et les métabolites primaires d'accompagnement). Bien que la concentration relative de certaines molécules de défense spécifiques du métabolisme spécialisé tende à augmenter sous l'effet du stress (comme cela sera discuté dans les sections suivantes), la baisse globale de la production de biomasse et le ralentissement des flux métaboliques primaires sous stress sévère entraînent une diminution nette de la masse totale de matière extractible par unité de poids sec de poudre végétale.

V.3.2. Détermination des polyphénols totaux

(Cette section est destinée à l'analyse et à la discussion des données relatives aux teneurs en composés phénoliques totaux quantifiées par la méthode de Folin-Ciocalteu et exprimées en mg EAG/g ES).

La quantification des composés phénoliques totaux constitue une étape clé pour évaluer la réponse du métabolisme spécialisé des deux Lamiacées face aux contraintes hydriques caractéristiques du Nord-Est algérien. La stimulation de la voie du shikimate et de la voie des phénylpropanoïdes sous stress modéré se traduit généralement par une accumulation active de molécules phénoliques. Ces dernières, grâce à la présence de groupements hydroxyles aromatiques, agissent comme des puissants agents de détoxification cellulaire vis-à-vis des ROS induites par la sécheresse.

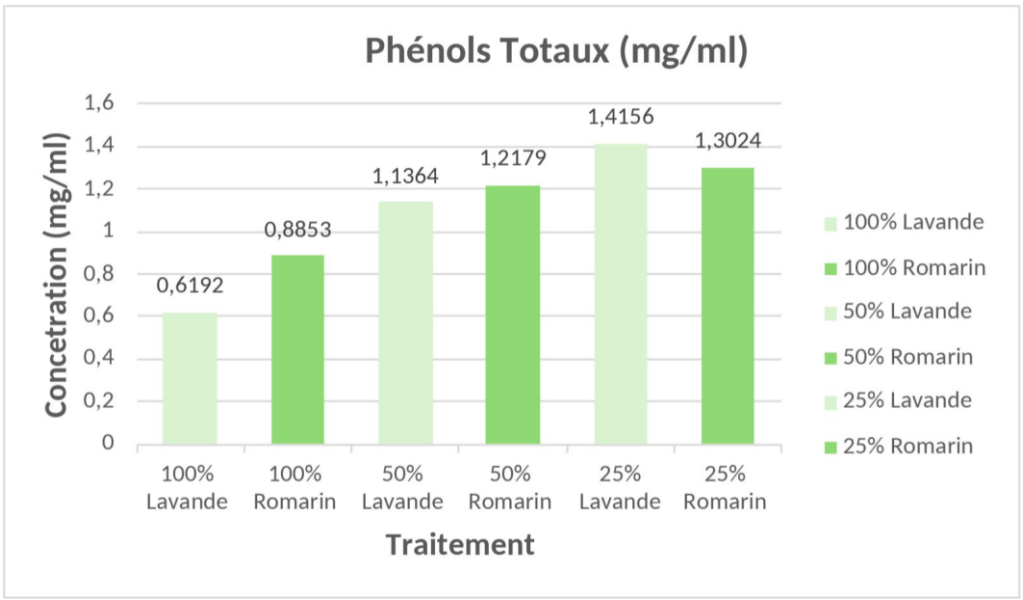


Figure V. 3 : Courbe d'étalonnage à l'acide gallique pour le dosage des polyphénols totaux et variations des teneurs en fonction du stress hydrique.

V.3.3. Détermination des flavonoïdes

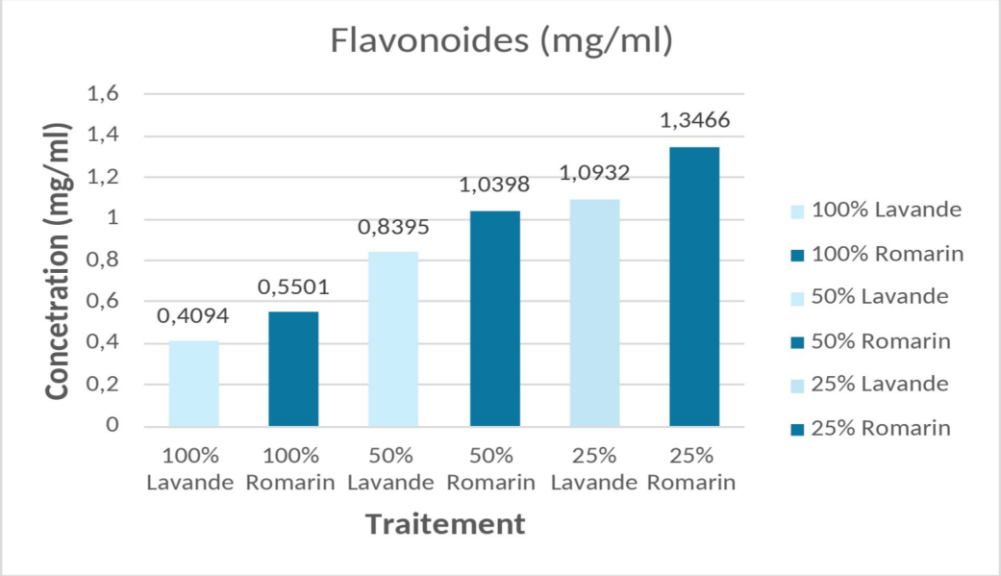


Figure V.4 : Courbe d'étalonnage à la quercétine pour le dosage des flavonoïdes totaux et cinétique d'accumulation sous stress hydrique.

Les flavonoïdes, sous-classe majeure des composés phénoliques, se comportent comme des indicateurs sensibles du stress abiotique. En tant que pigments et antioxydants, leur accumulation protège les structures cellulaires contre la photo-oxydation et stabilise les membranes chloroplastiques. L'analyse des variations de leurs teneurs sous les régimes de 100 %, 50 % et 25 % permettra de définir la capacité de modulation enzymatique du romarin et de la lavande face au déficit hydrique.

V.3.4. Détermination des tanins

Le dosage des tanins condensés (ou proanthocyanidines) permet de compléter le profil phytochimique des extraits foliaires soumis au stress hydrique. Ces polymères phénoliques jouent un rôle structural et protecteur important au niveau des tissus foliaires, renforçant la résistance chimique des parois cellulaires et participant au piégeage à long terme des radicaux libres au cours des processus d'acclimatation ou de sénescence induits par la sécheresse.

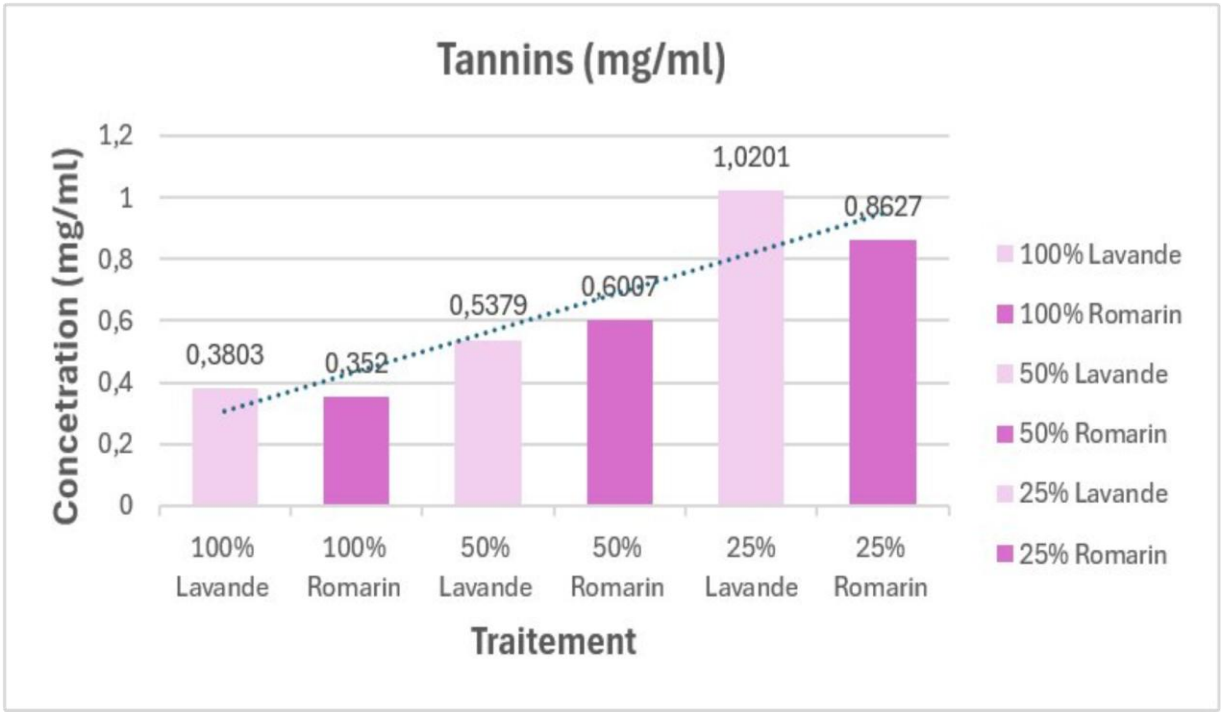


Figure V.5 : Courbe d'étalonnage à la catéchine pour le dosage des tanins condensés et profils comparatifs interspécifiques sous contrainte hydrique.

Conclusion générale

CONCLUSION

De nos jours, les plantes médicinales et aromatiques constituent un axe majeur de la recherche Pharmaco-biologique en raison de la richesse de leurs molécules bioactives et de leurs multiples Applications dans les domaines médical, pharmaceutique et cosmétique. Cependant, dans le contexte Actuel des changements climatiques mondiaux, ces systèmes végétaux font face à de sévères contraintes Environnementales.

En algérie, et particulièrement dans les régions du nord-est comme skikda, les Projections climatiques indiquent une réduction drastique des précipitations accompagnée d'une hausse Thermique significative, impactant de plein fouet la biodiversité et les rendements agricoles. L'objectif de notre travail était d'évaluer l'impact du déficit hydrique sur la composition Phytochimique et la biosynthèse des métabolites bioactifs chez deux espèces emblématiques de la Famille des lamiacées : le romarin (rosmarinus officinalis l.) Et la lavande (lavandula sp.). Afin de Caractériser leurs réponses adaptatives physiologiques et biologiques, de jeunes plants cultivés sous Serre au département des sciences agronomiques (université 20 août 1955 de skikda) ont été soumis à Trois régimes d'irrigation pendant trois mois : un lot témoin (100 % de la dose d'irrigation), un lot Soumis à un stress hydrique modéré (s1, 50 % de la dose d'irrigation) et un lot soumis à un stress Hydrique sévère (s2, 25 % de la dose d'irrigation). Les paramètres suivis comprenaient la détermination Des pigments chlorophylliens (chlorophylles a et b), l'extraction des huiles essentielles par Hydrodistillation de type clevenger, ainsi que la quantification spectrophotométrique des phénols totaux, Des flavonoïdes et des tanins. Les résultats physiologiques relatifs au métabolisme primaire ont révélé une diminution Profonde et dose-dépendante des pigments photosynthétiques à mesure que l'intensité du stress hydrique S'accentuait.

Chez rosmarinus officinalis l., la teneur en chlorophylle totale a chuté de manière Significative, passant de 103,13 mg/l pour le lot témoin à 78,26 mg/l sous stress modéré (s1), pour Atteindre un minimum de 53,33 mg/l sous stress sévère (s2). Une tendance régressive similaire a été Enregistrée chez lavandula sp., où la concentration en chlorophylle totale est passée de 96,33 mg/l (témoin) à 72,44 mg/l (s1), puis s'est effondrée à 46,49 mg/l en condition d'aridité sévère (s2). Ce Déclin physiologique est étroitement lié à la fermeture hydroactive des stomates — un mécanisme de Défense primaire stimulé pour restreindre les pertes d'eau par transpiration.

Cette fermeture limite la Disponibilité du co_2 interne, entraînant ainsi une baisse de l'efficacité photosynthétique. De plus, le Déficit hydrique persistant induit un stress oxydatif par la surproduction d'espèces réactives de l'oxygène (ros), accélérant la dégradation des membranes chloroplastiques et activant l'enzyme chlorophyllase. En rupture totale avec le métabolisme primaire, les screenings phytochimiques que nous avons Effectués ont mis en évidence une régulation positive et progressive remarquable du métabolisme 36secondaire en réponse à la rareté de l'eau. Nos quantifications biochimiques confirment cette sur- Biosynthèse défensive de manière rigoureuse pour l'ensemble des composés phénoliques analysés. Chez Le romarin (rosmarinus officinalis l.), la réduction de l'apport hydrique a provoqué une augmentation Remarquable de la teneur en flavonoïdes, qui est passée de 0,5501 mg/ml chez le témoin à 1,0398 mg/ml Sous stress modéré (50 %), pour culminer à 1,3466 mg/ml sous stress sévère (25 %). De même, les Concentrations en tanins ont suivi une trajectoire ascendante continue, s'élevant de 0,352 mg/ml (témoin) à 0,6007 mg/ml (50 %), puis atteignant 0,8627 mg/ml (25 %). Cette dynamique positive se Reflète fidèlement sur les phénols totaux, dont les teneurs ont progressé de 0,8853 mg/ml à 1,2179 mg/ Ml, pour se stabiliser à une valeur maximale de 1,3024 mg/ml en situation de déficit hydrique aigu (25 %). La lavande (lavandula sp.) a manifesté une réponse adaptative similaire, caractérisée par une Accumulation métabolique encore plus intense sous un stress sévère.

Nos analyses révèlent que les Teneurs en flavonoïdes se sont accrues de manière progressive, s'élevant de 0,4094 mg/ml (témoin) à 0,8395 mg/ml (50 %), pour atteindre 1,0932 mg/ml sous une irrigation à 25 %. Les tanins ont enregistré Une augmentation spectaculaire en condition de stress sévère, bondissant de 0,3803 mg/ml chez le Témoin à 0,5379 mg/ml (50 %), avant de culminer à 1,0201 mg/ml (25 %). Enfin, l'indice des phénols Totaux a plus que doublé, passant de 0,6192 mg/ml pour les plantes idéalement irriguées à 1,1364 mg/ml (50 %), pour s'établir à un maximum absolu de 1,4156 mg/ml sous stress critique (25 %). Cette Accumulation active de composés polyphénoliques constitue une réponse physiologique essentielle, ces Métabolites secondaires agissant comme de puissants agents antioxydants capables de piéger les Radicaux libres et de préserver la viabilité cellulaire face aux perturbations oxydatives induites par la Sécheresse.

L'analyse comparative entre les deux espèces démontre que le romarin possède une tolérance et Une résilience morpho-physiologique supérieures au déficit hydrique aigu par rapport à lavandula sp.. Le romarin a réussi à maintenir des concentrations de chlorophylle

nettement plus élevées sous stress Sévère (53,33 mg/l contre 46,49 mg/l). Cette performance adaptative est directement attribuée à ses Traits xérophytiques distinctifs, notamment une épaisse couche de cire cuticulaire et de petites feuilles Aciculaires et coriaces qui réduisent efficacement la transpiration cuticulaire, préservant ainsi l'intégrité De ses photosystèmes. En somme, nos conclusions indiquent que si le stress hydrique limite la croissance végétative et compromet les voies métaboliques primaires, il agit simultanément comme un puissant déclencheur biochimique qui valorise le potentiel phytochimique et pharmacologique de ces plantes médicinales en concentrant fortement leurs principes actifs thérapeutiques.

Cette étude ouvre la voie à de futures recherches visant à optimiser l'utilisation de ces plantes dans divers domaines pour leur potentiel pharmacologique et agricole, offrant ainsi des perspectives prometteuses en phytothérapie et en biostimulation végétale. Parallèlement, l'élargissement des 36investigations à la caractérisation par chromatographie (HPLC ou GC-MS) permettrait de déterminer les variations qualitatives précises des chémotypes induites par la sécheresse. De plus, l'évaluation in vitro des activités antimicrobiennes, anti-inflammatoires et antioxydantes des extraits stressés viendra valider leur potentiel fonctionnel accru. Dans un contexte plus large, ce travail s'inscrit pleinement dans les principes du développement durable en favorisant la valorisation des ressources botaniques locales et résilientes pour la santé, le bien-être et l'innovation industrielle.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Abdul Qadir, H. A. R. (2021). Medicinal and aromatic plants (Study in economic geography). *IJCISS, 3*(5), 21–34.

Ahmad, P., & Wani, M. R. (2014). *Physiological mechanisms and adaptation strategies in plants under changing environment* (Vol. 1). Springer.

Akıncı, S. (2013). *Responses of organisms to water stress*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/46157

Akshay, K., Swathi, K., Bakshi, V., & Boggula, N. (2019). Rosmarinus officinalis L.: An update review. *Journal of Drug Delivery and Therapeutics, 9*(1), 323–330.

Andrade, J. M., Faustino, C., Garcia, C., Ladeiras, D., & Reis, C. P. (2018). Rosmarinus officinalis L.: An update review. *Future Science OA, 4*(4), FSO283.

Ashraf, M. A., et al. (2018). Environmental stress and secondary metabolites in plants. In *Plant metabolites and regulation under environmental stress* (pp. 153–167). Academic Press.

Bajji, M., Lutts, S., & Kinet, J. M. (2000). La résistance au stress hydrique chez le blé dur. *Options Méditerranéennes*.

Bakhtache, R., & Hadjene, O. (2023). Les retombées du changement climatique sur les secteurs agricole et hydraulique en Algérie. *Revue Cahiers Économiques, 14*(1), 80–95.

Batiha, G. E. S., et al. (2023). A review of the bioactive components and pharmacological properties of Lavandula species. *Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology, 396*(5), 877–900. https://doi.org/10.1007/s00210-023-02392-x

Belmont, M. (2013). *Lavandula angustifolia M., Lavandula latifolia M., Lavandula x intermedia E.* [Thèse de doctorat en Pharmacie, Université Joseph Fourier]. Grenoble, France.

Benarba, B. (2016). Medicinal plants used by traditional healers from South-West Algeria. *Journal of Intercultural Ethnopharmacology, 5*(4), 320–330. https://doi.org/10.5455/jice.20160814115714

Bentley, R. (1999). Secondary metabolite biosynthesis: The first century. *Critical Reviews in Biotechnology, 19*(1), 1–40.

Bidgoli, R. D. (2018). Effect of drought stress on Rosemary (Rosmarinus officinalis L.). *Advancement in Medicinal Plant Research, 6*(3), 40–45.

Boizot, N., & Charpentier, J. P. (2006). *Cité par Chelighem et al., 2021/2022*.

Brock, A. (1925). *The more commonly occurring constituents of volatile oils* (pp. 105–107).

Bruneton, J. (1999). *Cité par Hammoudi, 2015*.

Cavanagh, H. M. A., & Wilkinson, J. M. (2002). Biological activities of lavender essential oil. *Phytotherapy Research, 16*(4), 301–308. https://doi.org/10.1002/ptr.1103

Champenoy, S., Tourte, M., Vauzelle, C., & Tourte, Y. (1999). La voie des isoprénoïdes chez les plantes. *Acta Botanica Gallica, 146*(1), 25–33. https://doi.org/10.1080/12538078.1999.10515798

Chaves, M. M., et al. (2002). How plants cope with water stress in the field. *Annals of Botany, 89*(7), 907–916. https://doi.org/10.1093/aob/mcf105

Chelighem, S., Bouketta, I., & Bergeullah, S. (2022). *Inventaire sur les plantes médicinales utilisées pour traiter les maladies gastriques dans la région de Mila* [Mémoire de Master, Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf]. Mila, Algérie.

Darwish, D. B. E., et al. (2026). Effects of drought duration on terpene profiles in rosemary. *BMC Plant Biology, 26*, Article 386. https://doi.org/10.1186/s12870-026-08193-7

De Oliveira, J. R., Camargo, S. E. A., & de Oliveira, L. D. (2019). Rosmarinus officinalis L. as therapeutic and prophylactic agent. *Journal of Biomedical Science, 26*(1), 1–22.

Dibong, S. D., et al. (2011). Ethnobotanique et phytomédecine des plantes médicinales de Douala. *Journal of Applied Biosciences, 37*, 2496–2507.

Dobros, N., Zawada, K. D., & Paradowska, K. (2023). Phytochemical profiling of Lavandula genus. *Molecules, 28*(1), 256.

Du, B., & Rennenberg, H. (2018). Physiological responses of lavender to water deficit. *South African Journal of Botany, 119*, 212–218. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2018.09.015

Ejaz, M., et al. (2017). *Cité par Chelighem et al., 2022*.

Evans, W. C. (2009). *Cité par Chelighem et al., 2021/2022*.

Farnsworth, N. R., et al. (1986). Place des plantes médicinales dans la thérapeutique. *Bulletin de l'OMS, 64*(2), 159–175.

Fyad, A., Bouaza, M., & Dib, M. E. (2013). Effet du stress hydrique sur les huiles essentielles. *Afrique Science, 9*(3), 112–124.

Gazwi, H. S. S., Mahmoud, M. E., & Hamed, M. M. (2020). Antimicrobial activity of rosemary leaf extracts. *Environmental Science and Pollution Research, 27*, 2007–2016. https://doi.org/10.1007/s11356-020-08111-w

Gharibi, S., et al. (2016). Effect of drought stress on total phenolic and antioxidant activity of Achillea species. *Applied Biochemistry and Biotechnology, 178*(4), 796–809. https://doi.org/10.1007/s12010-015-1909-3

Gharibi, S., et al. (2024). *Référence utilisée dans le texte — à compléter par les détails de publication*.

Ghorbanpour, M., Hazrati, S., & Mohammadi, H. (2020). Mechanisms of medicinal plants tolerance to abiotic stresses. In *Plant life under changing environment* (pp. 663–679). Academic Press.

Hammoudi, R. (2015). *Activités biologiques de quelques métabolites secondaires extraits de plantes médicinales du Sahara méridional algérien* [Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah]. Ouargla, Algérie.

Hasanuzzaman, M., et al. (2012). Plant response and tolerance to abiotic oxidative stress. In

Crop stress and its management (pp. 261–315). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-0072220-0_8

Hasanuzzaman, M., et al. (2019). The role of the plant antioxidant system in drought tolerance. *Antioxidants, 8*(8), 246.

Hemmami, H., Zeghoud, S., & Ben Seghier, B. (2023). Effects of water stress on medicinal and aromatic plants. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 34*, 100421. https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2023.100421

Herrmann, K. M. (1995). The shikimate pathway. *The Plant Cell, 7*(7), 907–919. https://doi.org/10.1105/tpc.7.7.907

Hopkins, W. G. (2003). *Cité par Mouloudi, 2019*.

Hosseini, R., & Heidari, M. (2025). Impact of drought stress on lavender. *Frontiers in Plant Science, 16*, 1506660. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1506660

Imadi, S. R., et al. (2016). Water stress: Types, causes, and impact. In *Water stress and crop plants* (Vol. 2, pp. 343–355). John Wiley & Sons.

Kara, K., & Brinis, L. (2012). Réponse physiologique au stress hydrique de variétés de blé tendre. *European Journal of Scientific Research, 81*(4), 524–532.

Kecis, H. (2023). *Comparaison de l'accumulation des métabolites secondaires chez Mentha rotundifolia L.* [Thèse de doctorat, Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf]. Mila, Algérie.

Khan, M. A., et al. (2023). Medicinal plants and their bioactive compounds under abiotic stress. *Acta Physiologiae Plantarum, 45*(3), 42. https://doi.org/10.1007/s11738-023-03521-x

Khenfir, M., & Hellali, R. (2021). Influence du stress hydrique sur les huiles essentielles. *Revue des bioressources, 11*(1), 45–58.

Kiani, R., Arzani, A., & Maali-Amiri, B. (2024). Drought-induced changes in secondary metabolites. *Plant Physiology and Biochemistry, 206*, 108215. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108215

Koch, G. (2018). *Effet du stress hydrique sur la croissance de la tomate* [Thèse de doctorat, Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse]. Avignon, France.

Lawlor, D. W. (2002). Water stress inhibits plant photosynthesis by decreasing coupling factor and ATP. *Journal of Experimental Botany, 53*(372), 777–787.

Liao, P., et al. (2016). The potential of the mevalonate pathway for enhanced isoprenoid production. *Biotechnology Advances, 34*(5), 697–713. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.03.005

Lis-Balchin, M. (Ed.). (2002). *Lavender: The genus Lavandula*. Taylor & Francis.

Maeda, H., & Dudareva, N. (2012). The shikimate pathway and aromatic amino acid biosynthesis in plants. *Annual Review of Plant Biology, 63*, 73–105. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105439

Marrelli, M. (2021). Medicinal plants. *Plants, 10*(7), 1355. https://doi.org/10.3390/plants10071355

Mateu-Andrés, I., et al. (2013). Geographical patterns of genetic variation in rosemary. *Botanical Journal of the Linnean Society, 171*(4), 700–712.

Mittler, R. (2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science, 7*(9), 405–410.

Mouloudi, D. (2019). *Effet du stress hydrique sur Chenopodium quinoa Willd.* [Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah]. Ouargla, Algérie.

Mujica, A., et al. (2001). *Cité par Mouloudi, 2019*.

Nazari, M., Karimi, A., & Gholami, M. (2023). Impact of drought stress on secondary metabolites. *Phytochemistry Reviews, 22*(4), 915–935. https://doi.org/10.1007/s11101-02309852-w

Nieto, G., Ros, G., & Castillo, J. (2018). Antioxidant and antimicrobial properties of rosemary. *Medicines, 5*(3), 98.

Nsemi, I. (2010). *Cité par Chelighem et al., 2021/2022*.

Olmos, E., et al. (2007). Subcellular effects of drought stress in Rosmarinus officinalis. *Plant Biology, 9*(1), 77–84.

Oukara, F. Z., Chaouia, C., & Benrebiha, F. Z. (2017). Contribution à l'étude de l'effet du stress hydrique sur le pistachier de l'Atlas. *Revue Agrobiologia, 7*(1), 225–232.

Patra, B., et al. (2013). Transcriptional regulation of secondary metabolite biosynthesis. *Biochimica et Biophysica Acta, 1829*(11), 1236–1247.

Petkova, B., Kuzmova, K., & Berova, M. (2019). Les principaux facteurs de stress abiotiques en Bulgarie. *Sciences Agricoles, 11*(26). https://doi.org/10.22620/agrisci.2019.26.002

Pu, X., et al. (2024). Plant secondary metabolite biosynthesis. *Frontiers in Plant Science, 15*, 1477551. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1477551

Qaderi, M. M., Martel, A. B., & Strugnell, C. A. (2023). Environmental factors regulate plant secondary metabolites. *Plants, 12*(3), 447. https://doi.org/10.3390/plants12030447

Rahman, I. M. M., & Hasegawa, H. (Eds.). (2012). *Water stress*. Intech.

Reshi, Z. A., et al. (2023). From nature to lab: Secondary metabolite biosynthetic pathways. *Metabolites, 13*(8), 895. https://doi.org/10.3390/metabo13080895

Rifaï, K. M. (2012). تويزلاتورطعزا[Les huiles essentielles]. Université d'Al-Azhar, Égypte.

Salehi-Lisar, S. Y., & Bakhshayeshan-Agdam, H. (2016). Drought stress in plants: Causes, consequences, and tolerance. In *Drought stress tolerance in plants* (Vol. 1). Springer.

Samarah, N. H. (2016). Understanding how plants respond to drought stress. In *Drought stress tolerance in plants* (Vol. 2). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32423-4_1

Santos-Zea, L., Gutiérrez-Uribe, J. A., & Benedito, J. (2020). Bioactive compounds from medicinal plants. *Foods, 9*(11), 1534. https://doi.org/10.3390/foods9111534

Sharma, A., et al. (2019). Response of phenylpropanoid pathway in plants under abiotic stress. *Molecules, 24*(13), 2452. https://doi.org/10.3390/molecules24132452

Sharma, M. K. (2024). Biochemical properties of cultivated medicinal plants under harsh conditions. *Current Agriculture Research Journal, 12*(1). http://dx.doi.org/10.12944/CARJ.12.1.07

Shil, S., Mohanty, S., & Verma, R. K. (2021). Impact of drought stress on secondary metabolites and essential oil. *Environmental and Experimental Botany, 186*, 104452. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104452

Sofowora, A. (2010). *Medicinal plants and traditional medicine in Africa* (1st ed., reprint). Spectrum Books; Karthala.

Tabassum, N., & Ahmad, F. (2011). Role of natural herbs in the treatment of hypertension. *Pharmacognosy Reviews, 5*(9), 30–40. https://doi.org/10.4103/0973-7847.79097

Upson, T. (2002). The taxonomy of the genus Lavandula L. In M. Lis-Balchin (Ed.), *Lavender: The genus Lavandula* (pp. 2–34). Taylor & Francis.

Vranová, E., Coman, D., & Gruissem, W. (2013). Network analysis of the MVA and MEP pathways. *Annual Review of Plant Biology, 64*, 665–700. https://doi.org/10.1146/annurevarplant-050312-120116

Wahab, S., et al. (2022). Drought stress and plant responses. *Plants, 11*(13), 1712. https://doi.org/10.3390/plants11131712

Wairimu, M. G. (2025). The economic impact of medicinal plants on health systems. *Newport International Journal of Public Health and Pharmacy, 6*(2), 50–56. https://doi.org/10.59998/NUPP/2005/695056

Zhang, X., et al. (2019). Plant responses to water stress. *Plant Physiology and Biochemistry,*

135, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.11.020