

République Algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique Université «Abderrahmane mira» de Bejaïa



Département de sciences biologiques

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master 2 en Science Biologiques (Ecologie
et Environnement)

Thème

**Étude de l'influence de certains facteurs
environnementaux sur la variabilité de
l'huile essentielle d'une lamiacée
endémique de la flore Algérienne**

Présenté par :

M^{elle}. HAROUN Yassinia et DJARMOUNI Assia

Soutenu le 01-07-2025

Devant le jury composé de :

M. CHELLI A/M.	Université de Bejaïa	Président
M.BENKHENOUCHE N.	Université de Bejaïa	Examineur
M.ADJAOUD A/R.	Université de Bejaïa	Promoteur

Année universitaire : 2024 / 2025

REMERCIEMENTS

Au moment de conclure ce travail, il est de mon devoir de commencer par exprimer ma reconnaissance envers Allah, le Tout-Puissant, sans qui ce parcours n'aurait pas été possible. À Lui seul revient toute ma gratitude.

Je remercie également mes parents, qui ont toujours été mes premiers soutiens. Leur amour, leurs sacrifices et leurs encouragements constants ont été la source de ma force et de ma persévérance.

Je tiens à exprimer ma gratitude sincère à mon encadrant, monsieur Adjaoud A, pour sa guidance et ses conseils éclairés tout au long de ce projet.

Je remercie également monsieur Chelli A/M, Président de jury, pour sa bienveillance et son professionnalisme. Ses remarques et ses suggestions ont été des plus enrichissantes, permettant d'enrichir et de perfectionner notre travail.

Egalement un grand merci à monsieur Benkhennouche N, examinateur, pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail et ses critiques constructives qui m'ont permis d'approfondir davantage mes réflexions et d'améliorer la qualité de cette étude.

Sans oublier notre chef de spécialité monsieur Ramdani N qu'il est toujours disponible à nous aider et nous orienter à tout moment et n'importe où. À chacun d'entre vous, je présente mes remerciements les plus sincères et ma profonde reconnaissance.



DEDICACES

À mes chers parents, À vous qui êtes la source de ma force, de mon courage et de mon ambition. Merci pour votre amour inconditionnel, vos sacrifices silencieux et votre foi constante en moi. Sans vous, rien n'aurait été possible.

À mes tendres grands-parents, Pour votre bienveillance, vos prières et Votre présence apaisante dans ma vie. Votre sagesse m'a toujours guidée.

À mon frère et à ma sœur, Merci pour votre soutien discret, vos encouragements et ces moments de complicité. À toute ma grande famille, Je vous dédie aussi ce travail. Chacun de vous, par un mot, un geste ou une pensée, a contribué à ce parcours. Vous êtes dans mon cœur à chaque page de ce mémoire merci surtout pour votre confiance en moi qui me donne la force d'aller toujours plus loin. À mes précieuses amies : Asma, Taous, yasmina, Belynda, Salima, Mounia, Liticia, Lylia Merci d'avoir été là Dans les moments de doute comme dans les éclats de rire. Vos mots et Votre présence a compté plus que vous ne l'imaginez.

À mon cher binôme, Merci pour ton écoute, ta patience, ta collaboration et cette belle aventure partagée jusqu'au bout. Tu as été une alliée précieuse dans chaque étape de ce travail.

À mes collègues et camarades de Master, Pour tous ces souvenirs que l'on emportera avec nous : les discussions, les éclats de rire, les nuits blanches, les examens... et surtout cette complicité inoubliable Merci d'avoir été là.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce Mémoire, Recevez ici l'expression de ma profonde gratitude.



DEDICACES

*Je dédie ce mémoire, fruit de longues années d'efforts et de persévérance :
À mes parents, pour leur amour inestimable, leur soutien constant et leurs
sacrifices silencieux. Vous êtes ma force et mon refuge.*

À mon frère, pour sa présence rassurante et ses encouragements sincères.

*À mon cher mari, pour sa patience, son appui indéfectible et sa
compréhension tout au long de ce parcours.*

*À mes deux merveilleuses filles, qui illuminent ma vie et me donnent chaque
jour une raison de me surpasser.*

*À mon binôme, pour cette belle complicité, les partages, les rires, et le
courage mutuel durant cette aventure universitaire.*

*À mes collègues, pour leur entraide, leur motivation et les moments
partagés.*

*À ma tendre grand-mère, dont les prières m'ont toujours accompagnée, avec
Tant d'amour et de bienveillance.*

À mes tantes, pour leur affection sincère et leur soutien chaleureux.

*À mes amies Ahlam et Haouchi Meriem, pour leur fidélité, leur écoute, et
Les moments précieux d'amitié vraie.*

*Merci à chacun de vous d'avoir été, à votre manière, une part essentielle de
Ce chemin.*



Liste des tableaux

Numéro	Titre	Page
N°1	La classification des lamiacées	
N°2	Position systématique de l'espèce étudiée	
N°3	Caractéristiques des sites de récolte	
N°4	Caractéristiques organoleptiques des huiles essentielles du Thym étudié	
N°5	Propriétés physicochimiques des huiles essentielles des trois morphotypes de thym étudiés	
N°6	Propriétés physiques des sols étudiés	
N°7	Résultats des analyses climatiques et bioclimatiques	
N°8	Matrice de corrélation (pearson) : Facteurs édaphiques-Rendement en HE des thym étudiés	
N°9	P-value	
N°10	Matrice de corrélation (pearson) : Facteurs climatique –indices bioclimat /Rendement en HE des thym étudiés	
N°11	P-value	
N°12	Les valeurs propres des variables	

Liste des figures

Numéro	Titre	Page
N°1	Représentation schématique du processus d'hydrodistillation des huiles essentielles.	
N°2	Représentation schématique du processus d'extraction des HE par distillation à la vapeur.	
N°3	Unité d'isoprène.	
N°4	Anneau aromatique.	
N°5	Répartition géographique des lamiacées en Algérie.	
N°6	Photographie de l'espèce étudiée	
N°7	Dessin schématique d'hydrodistillateur de type clevenger.	
N°8	Photographie du réfractomètre d'Abbe.	
N°9	Photographie du polarimètre de Laurent	
N°10	Photographie d'une tamiseuse automatique avec des tamis placés en ordre.	
N°11	Photographie du pH mètre de paillasse	
N°12	Photographie de conductimètre de paillasse	
N°13	Photographie du montage l'appareillage du dosage du carbone (Anne modifiée).	
N°14	Photographie des appareils de minéralisation et de distillation l'azote	
N°15	photographie du spectrophotomètre UV-visible.	
N°16	Photographie du photomètre à flamme	
N°17	Rendement en HE des différents morphotypes de thym étudié.	
N°18	les triangles de texture USDA des sols étudiés (A-B-C).	
N°19	Evolution spatiale des propriétés physico-chimiques des sols étudiés.	
N°20	Evolution spatiale de $P_{H_{eau}}$, $P_{H_{KCl}}$ et de la conductivité électrique des sols analysés .	
N°21	Evolution spatiale des propriétés physico-chimiques des sols étudiés.	
N°22	cercle de corrélation de l'ACP.	
N°23	Contribution des observations.	
N°24	Biplot de l'ACP	

Liste des abréviations

Abréviations	Significations
AFNOR	Association Française de Normalisation
C	Carbone
CE	Conductivité électrique
CCM	Chromatographie sur couche mince
CPG	Chromatographie phase gazeuse
COV	Composés organiques volatils
GC	Chromatographie en phase gazeuse
GC/MS	Chromatographie en phase gazeuse couplée au spectromètre de masse
H	Hydrogène
HE	Huile essentielle
ISO	International Organisation for Standardisation
MO	Matière Organique
MS	Spectromètre de masse
RHE %	Rendements des huiles essentiels en pourcentage
PHE	Poids des huiles essentiels

Sommaire

Remerciements Dédicaces

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Résumé

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I revue bibliographique.....	3
1. Généralités sur les huiles essentielles.....	3
1.1. Définition.....	3
1.2. Historique.....	3
2. Techniques d'extraction des huiles essentielles.....	3
2.1. Extraction par hydrodistillation.....	4
2.1.1. La distillation.....	4
2.1.2. Extraction par vapeur.....	5
2.2. Extraction par Pressage à froid.....	6
2.3. Extraction par solvant organique.....	7
3. Composition chimique des huiles essentielles.....	7
3.1. Terpènes.....	8
3.2. Phénylpropanoïdes.....	9
4. Indicateurs de qualité des huiles essentielles.....	9
4.1. La certification botanique.....	9
4.2. L'organe utilisé.....	10
4.3. Le mode d'extraction.....	10
5. Facteurs de variation des huiles essentielles.....	10
5.1. Facteurs génétiques.....	11
5.1.1. Chémotype.....	12
5.2. Facteurs pédoclimatiques.....	13
6. Présentation de la famille des lamiacées.....	13
6.1. Taxonomie.....	13
6.2. Caractéristiques botaniques.....	14
6.3. Répartition et distribution.....	14
6.3.1. Dans le monde.....	14
6.3.2. En Algérie.....	14
7. Présentation du genre Thymus.....	15

8. Importance de l'huile essentielle	16
8.1. Importance écologique.....	16
8.2. Importance économique.....	16
Chapitre II Matériels et méthodes	17
Matériels et méthodes	18
1. Matériels végétaux.....	18
1.1. Description botanique.....	18
1.2. Position systématique	18
2. Echantillonnage et extraction des huiles essentielles.....	19
2.1. Echantillonnage et traitement du végétale	19
2.2. Extraction des huiles essentielles (hydrodistillation)	19
3. Propriétés physico-chimiques.....	20
3.1. Détermination du rendement	20
3.2. Analyse organoleptique	21
3.3. La densité.....	21
3.4. Indice de réfraction.....	21
3.5. Pouvoir rotatoire	22
3.6. Indice d'acide	23
3.7. Indice d'ester	23
3.8. Indice de peroxyde.....	24
3.9. Indice de saponification.....	24
3.10. Indice d'iode.....	25
4. Analyses physico-chimiques des sols	25
4.1. Analyses granulométriques.....	25
4.2. Le PH du sol	26
Figure 11 : Photographie du pH mètre de paillasse	26
4.3. Conductivité électrique.....	27
Figure 12 : Photographie du conductimètre de paillasse	27
4.4. Dosage du carbone organique.....	27
4.5. Dosage de l'azote total.....	28
4.6. Dosage du phosphore assimilable.....	28
4.7. Dosage du Ca^{2+} et Mg^{2+}	29
4.8. Dosage du K^{+} et Na^{+}	29
5. Les données climatiques	29
5.1. Indice de thermicité (I_t).....	29
5.2. Indice de continentalité (I_c).....	30
5.3. Indice ombrothermique (I_o) ;.....	30
5.4. Indice ombrothermique d'été (I_{ov})	30
5.5. Température positive annuelle (T_p).....	30

5.6. Température annuelle négative (T_n).....	30
5.7. Température d'été (T_v)	30
5.8. Précipitation positive (P_p)	30
5.9. Précipitations d'été (P_v).....	30
6. Analyse statistique des données.....	31
Résultats & discussion.....	32
1. Rendement et caractéristique organoleptique	32
2. Propriétés physicochimiques des huiles essentielles.....	33
3. Analyse des paramètres des sols	36
4. Analyse des indices climatique et bioclimatique	45
4.1. Climat	45
4.2. Bioclimat	45
5. Variabilité des rendements d'extraction en fonction des facteurs environnementaux	46
5.1. Effets des propriétés du sol sur la production en HE de <i>Thymus spp</i>	46
5.2. Effets du climat et du bioclimat sur la production en HEs de <i>Thymus spp</i>	49
5.3. Effets combinés des facteurs de l'environnement sur la variabilité des HEs de <i>Thymus ssp</i>	51
6. Valeurs propres des variables	51
6.1. Cercle des corrélations	51
Conclusion générale	56

Conclusion

Références bibliographiques

Annexes



INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les plantes jouent un rôle crucial dans la survie sur notre planète, en produisant de l'oxygène, en offrant des ressources ornementales, et en fournissant des matières premières pour divers secteurs industriels tels que le textile et la construction (**Bourgaud et al., 2001**). Grâce à leur totipotence cellulaire et à leur capacité de multiplication indéfinie, elles agissent en tant que producteurs primaires dans la majorité des écosystèmes (**Zhao et al., 2017**).

En tant que première source alimentaire, les plantes fournissent des hydrates de carbone, des protéines, des lipides et des vitamines, qui sont réunis sous le terme de métabolites primaires. Parallèlement, elles produisent une variété de métabolites secondaires, tels que les huiles essentielles, les flavonoïdes, les alcaloïdes et les glycosides...etc., qui possèdent des propriétés pharmacologiques, industrielles, écologiques et économiques considérables (**Gachathi et al., 2019**).

Ces métabolites secondaires résultent d'un processus éco-physiologique complexe du métabolisme des plantes. Elles sont générées pour faire face aux contraintes environnementales et aux interactions biotiques négatives, servant d'outils de défense contre les pathogènes et les prédateurs. Ainsi, elles permettent aux plantes de s'adapter aux changements de leur environnement, assurant une meilleure croissance et un meilleur succès reproductif (**Riaz et al., 2023**).

Les huiles essentielles, sont déterminantes pour la capacité des plantes aromatiques à résister à des conditions environnementales difficiles. Elles servent de réserve d'énergie en cas de conditions défavorables et sont largement utilisées dans les domaines de la phytothérapie, de l'agroécologie et de l'industrie pharmaceutique (**Safi, 2024**).

Les Lamiacées, grâce à leur production d'huiles volatiles, ont une importance économique notable parmi les familles botaniques. Plusieurs espèces appartenant à cette famille, en particulier celles du genre *Thymus*, génèrent des quantités significatives d'huiles essentielles (**Santos, 2000**).

Cependant, plusieurs facteurs influencent le rendement et la qualité des huiles essentielles extraites des plantes aromatiques du genre *Thymus*. Le facteur génétique joue un rôle essentiel dans la détermination de la composition et du rendement des huiles essentielles, qui varient en fonction de l'âge, du cycle de croissance et de l'organe de la plante utilisé pour l'extraction (**Hudaib et al., 2002**).

De plus, les facteurs environnementaux, principalement les facteurs climatiques et édaphiques liés à la situation géographique, les variations physiologiques, l'heure et la saison de la récolte, ont également un rôle essentiel dans la détermination de la composition et du

rendement des huiles essentielles (**Salehi et al., 2014**).

Dans ce contexte, notre étude vise à étudier l'influence de facteurs environnementaux sur la variabilité de l'huile essentielle d'une Lamiacée endémique de la flore algérienne, dans une optique de valorisation de cette ressource végétale à fort potentiel biologique et économique.



CHAPITRE I
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I revue bibliographique

1. Généralités sur les huiles essentielles

1.1. Définition

Les huiles essentielles (HEs) sont des substances volatiles et aromatiques naturellement présentes dans les plantes aromatiques. Elles en constituent les composés odorants responsables de leurs senteurs spécifiques. Issues du métabolisme secondaire des végétaux, elles sont extraites principalement par entraînement à la vapeur d'eau, hydrodistillation ou expression mécanique. Ces huiles, composées de mélanges complexes de molécules, possèdent des propriétés variées et des usages multiples, à l'origine d'une branche spécialisée de la phytothérapie : l'aromathérapie (**El Asbahani et al., 2015**).

Selon la norme AFNOR NF T 75-006, une HE est un produit extrait d'un végétal par entraînement à la vapeur ou par hydrodistillation, puis séparé de la phase aqueuse par des méthodes physiques. L'huile ainsi obtenue est hydrophobe, légère, et caractérisée par une odeur spécifique. Lors du processus de distillation, les molécules les plus volatiles sont transportées avec la vapeur, puis l'huile se distingue de l'eau distillée, bien qu'une partie résiduelle demeure dans celle-ci, formant ce que l'on appelle une eau aromatique (**Bruneton, 2009 ; Kaloustian et Hadji-Minaglou, 2012 ; Dhifi et al., 2016**).

1.2. Historique

Le terme « huile essentielle » a été introduit au XVI^e siècle par le médecin suisse Paracelse (Paracelsus Von Hohenheim) pour désigner le principe actif extrait d'un remède naturel (**Guenther, 1948**). À ce jour, environ 3000 huiles essentielles sont identifiées, parmi lesquelles environ 300 sont exploitées commercialement, principalement dans les secteurs des arômes et des parfums (**Lawless, 1996 ; Lis-Balchin, 2006 ; Turek et Stintzing, 2013**). Depuis l'Antiquité, les HE jouent un rôle essentiel dans la vie humaine, utilisées tant pour le parfum, la cuisine et pour des usages médicaux. Elles se trouvent dans de petites glandes réparties dans diverses parties des plantes : feuilles, fleurs, fruits, graines, écorce, et parfois racines (**El Asbahani et al., 2015**).

2. Techniques d'extraction des huiles essentielles

Les HEs, constituées de composés de faible poids moléculaire (généralement inférieurs à 500 D), sont extraites des plantes médicinales à travers un processus en deux étapes : une phase d'extraction ou de distillation pouvant durer plusieurs heures, suivie d'une

Analyse portant sur les paramètres physico-chimiques. Diverses techniques d'extraction des HEs existent, telles que la distillation à la vapeur, l'hydrodistillation, l'extraction par solvant organique, l'expression, l'enfleurage, la distillation assistée par micro-ondes, l'hydrodiffusion assistée par micro-ondes, l'extraction par solvant sous haute pression, l'extraction au dioxyde de carbone supercritique, l'extraction par ultrasons, l'extraction par micro-ondes sans solvant, ainsi que le procédé photonique (Ferhat *et al.*, 2010; Okoh *et al.*, 2010). À l'échelle industrielle, la distillation à la vapeur reste la méthode la plus couramment utilisée pour extraire ces composés (Masango, 2005). Reposant sur un chauffage et une agitation prolongée dans l'eau ou l'utilisation d'un solvant, à l'aide d'appareils tels que Clevenger ou Dean-Stark ou Likens-Nikerson. Cette méthode représente plus de 70 % de la consommation énergétique et de la durée totale du procédé, tout en nécessitant une quantité importante de solvant (Ferhat *et al.*, 2007). Cependant, la distillation à la vapeur présente plusieurs limites : les températures élevées et l'eau peuvent altérer chimiquement les huiles essentielles, tandis que certains composants très volatils ou solubles dans l'eau peuvent être perdus durant le processus. De plus, l'extraction par solvant rend difficile l'obtention d'un produit totalement exempt de résidus organique (Guan *et al.*, 2010; Khajeh *et al.*, 2010). Par ailleurs, les monoterpènes, en particulier, sont sensibles aux dégradations chimiques et aux pertes de constituants volatils, surtout lors de l'évaporation du solvant après une extraction classique ou une distillation à la vapeur (Lo Presti *et al.*, 2005).

2.1. Extraction par hydrodistillation

2.1.1. La distillation

La technique d'extraction standard des HEs est l'hydrodistillation (HD) (Figure 1). Elle facilite l'extraction de substances naturelles qui ne se dissolvent pas dans l'eau et qui ont un point d'ébullition élevé. La méthode implique de plonger entièrement la substance végétale dans l'eau, puis de la porter à ébullition. Cette procédure est habituellement effectuée sous pression atmosphérique. Le système de réfrigération à un débit d'eau qui condense la vapeur produite (Souiy, 2023).

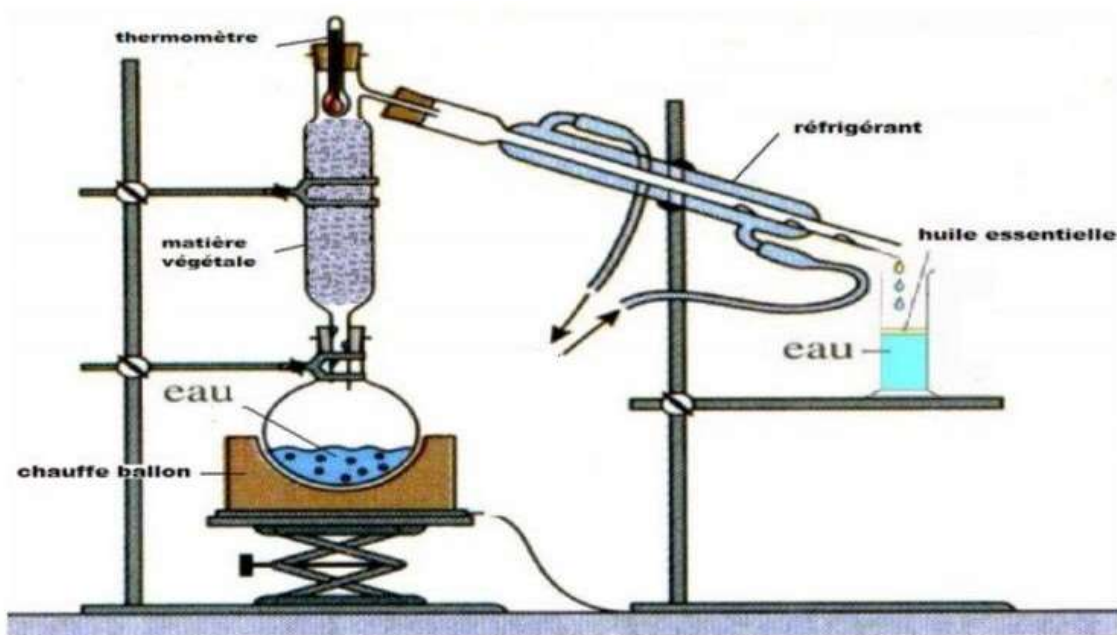


Figure 1 : Représentation schématique du processus d'hydrodistillation des huiles essentielles (Clevenger.1928)

Cette technique préserve les huiles extraites d'une surchauffe. Le bénéfice de cette méthode réside dans le fait que la matière première peut être distillée à des températures en dessous de 100 °C. L'extraction des huiles essentielles par distillation peut paraître facile, cependant elle comporte de nombreux inconvénients.

Il faut souligner que l'exposition prolongée à l'eau bouillante peut entraîner des réactions de décomposition et l'hydrolyse d'estérification, ce qui pourrait avoir de sérieux impacts sur les huiles riches en esters. Il est souvent indispensable de procéder à une purification pour se débarrasser des impuretés ou des éléments non désirés qui causent une odeur désagréable. La durée de distillation diffère en fonction du type de matière végétale, les éléments ligneux requérant des périodes plus étendues que les plantes herbacées (Guenther, 1948).

2.1.2. Extraction par vapeur

L'extraction par vapeur (Figure 2) est une technique couramment employée et reconnue pour l'obtention des HE à partir des végétaux. Cette technique concerne 93 % des extractions d'huiles essentielles et peut durer de 1 à 10 heures selon divers paramètres, tels que le temps d'extraction, la température, la pression et le genre de matière utilisée (Baars et al., 2021).

Dans ce processus d'extraction, la matière végétale est soumise à un courant de vapeur sans être préalablement macérée. L'application de chaleur décompose les cellules présentes dans la matière végétale, ce qui entraîne la libération d'HE. Après avoir saturé en composés volatils, la vapeur est condensée et HE est extraite en décantant le mélange eau/huile (**Souiy et al.,2022**).

Un des bénéfices de l'extraction à la vapeur est que le fait qu'il n'y ait pas de contact direct entre l'eau et la plante, puis entre l'eau et les molécules aromatiques, empêche l'hydrolyse ou la décomposition de HE (**Raaman, 2006**). Il est possible de recueillir les fractions de tête, qui renferment les molécules les plus volatiles, en seulement trente minutes, avec 95 % des molécules volatiles collectées (**Gavahian et Chu, 2018**).

Cette méthode repose sur le maintien d'une pression de vapeur combinée approximativement à 100 °C, correspondant à la pression ambiante, ce qui permet aux substances volatiles ayant un point d'ébullition situé entre 150 et 300 °C de s'évaporer à une température proche de celle de l'eau. Il convient aussi de mentionner que cette méthode peut être effectuée sous pression, en fonction de la complexité de l'extraction des HE (**Guenther, 1948**).

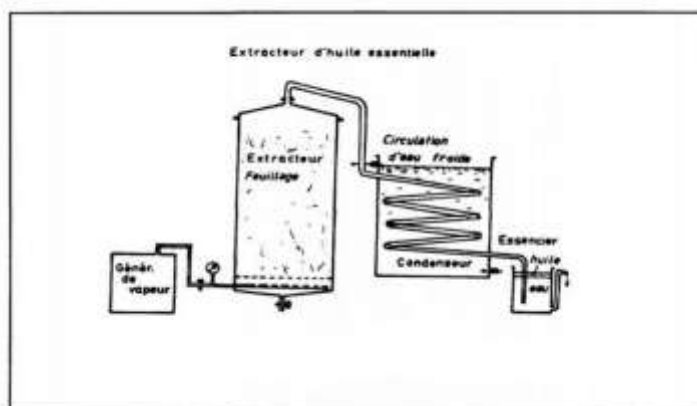


Figure 2 : Représentation schématique du processus d'extraction des HE par distillation à la vapeur (**Belleau, 1990**).

2.2. Extraction par Pressage à froid

La méthode de pression à froid, utilisée depuis longtemps pour extraire les HE des écorces d'agrumes tels que le citron, l'orange, la bergamote et le pamplemousse. Cette méthode implique la rupture mécanique des écorces par simple pression afin de libérer les essences volatiles présentes dans les péricarpes des agrumes. Avant le début du XXe siècle, la production d'huiles d'agrumes par pression à froid se faisait manuellement. Cette méthode génère une émulsion à base d'eau, qui est par la suite centrifugée afin d'extraire HE (**Bousbia,**

2011).

2.3. Extraction par solvant organique

On utilise fréquemment l'extraction par solvant pour obtenir les HE thermolabiles, telles que celles qui proviennent des fleurs. La matière végétale est immergée dans un solvant. Le solvant se charge en molécules aromatiques à travers des lavages successifs. Après avoir été séparée par filtration, l'émulsion est distillée afin d'obtenir les HE. On a eu recours à l'extraction par solvant pour les fleurs fragiles ou délicates, qui ne peuvent pas résister à la température de distillation. On peut avoir recours à divers solvants, tels que l'hexane, l'acétone, l'éther pétrolier, l'éthanol ou le méthanol pour procéder à une extraction (**Tongnuanchan et Benjakul, 2014**).

L'extraction par solvant se fait de manière assez rapide et à un coût faible. Le choix du solvant doit respecter les critères d'acceptabilité, d'inertie et de stabilité face à la chaleur, à la lumière et à l'oxygène. Il est préférable que sa température d'ébullition soit faible pour en faciliter l'élimination. L'HE produite a une petite proportion de résidus de solvant, ce qui l'empêche d'être utilisée dans le domaine alimentaire. Toutefois, si l'alcool est employé en tant que solvant, il est classé comme étant de qualité alimentaire et sûre à consommer. On recourt fréquemment à cette technique dans le secteur de la parfumerie (**Hanif et al., 2019**).

On procède ensuite à la concentration du filtrat par évaporation du solvant. On mélange avec de l'alcool pur pour obtenir l'HE, puis on procède à une distillation à basse température. Cette approche est assez longue, ce qui fait que les HE sont plus onéreux que les autres techniques. Par ailleurs, les résidus de solvants contenus dans le produit fini peuvent induire des allergies, des toxicités et nuire au système immunitaire (**Ferhat et al., 2007**).

3. Composition chimique des huiles essentielles

On distingue principalement deux catégories de métabolites dans la nature : les métabolites primaires et les métabolites secondaires. Les métabolites primaires, qui comprennent les protéines, les glucides, les lipides et les acides nucléiques, sont des composés omniprésents au sein de tous les êtres vivants. Les métabolites secondaires, qui ne se trouvent que chez certaines espèces, sont catégorisés en terpénoïdes, shikimates, et alcaloïdes.

Les HEs sont constitués de divers composés chimiques. Ses composés sont essentiellement classés en deux catégories chimiques distinctes : les terpènes et les phénylpropanoïdes. Même si les HEs contiennent généralement une plus grande variété et quantité de terpènes et de leurs dérivés oxygénés (terpénoïdes), Ces composés, lorsqu'ils sont présents, donnent à la plante une odeur et un goût distinctifs (**Tisserand et Young, 2013 ; Zuzarte et Salgueiro, 2015**).

3.1. Terpènes

Les terpènes et les terpénoïdes proviennent de la condensation de l'isoprène (C_5H_8) (2-méthyl-1,3-butadiène), une unité à cinq carbones ayant deux doubles liaisons. C'est la raison pour laquelle ils sont fréquemment désignés comme des isoprénoïdes (**Figure 3**). On observe une multitude de structures isomères, qu'elles soient cycliques ou linéaires, avec différents niveaux d'insaturation, de substitution et de dérivation oxygénée, communément appelées terpénoïdes (**Berger, 2007 ; Zuzarte et al., 2012**). Les unités d'isoprène se lient dans un seul sens. La tête de la molécule est l'extrémité ramifiée de la chaîne, tandis que l'autre extrémité est appelée queue. Ainsi, l'arrangement de la structure est désigné comme liaison tête-queue. Ce couplage pourrait être justifié par la biosynthèse des terpénoïdes (**Mann et al., 2005**). En outre, les terpènes représentent la classe la plus étendue et variée de composés organiques volatils (COV). On classifie les terpènes en diverses catégories basées sur leur structure et leurs fonctions. Les terpènes sont catégorisés en fonction du nombre d'unités isoprènes qu'ils contiennent : les hémiterpènes (C_5H_8) (une unité), les monoterpènes ($C_{10}H_{16}$) (deux unités), les sesquiterpènes ($C_{15}H_{24}$) (trois unités), les diterpènes (quatre unités), et ainsi de suite. Les HE sont majoritairement des combinaisons très complexes de monoterpènes ($C_{10}H_{16}$) et de sesquiterpènes ($C_{15}H_{24}$), tout en comprenant des phénols apparentés biogénétiquement (phénylpropanes et acide cinnamique), sans oublier les glucides, alcools, éthers, aldéhydes et cétones qui leur attribuent leurs propriétés distinctives. Par ailleurs, des traces de terpènes plus pesants tels que les diterpènes peuvent parfois se retrouver dans les huiles essentielles à quatre unités isoprènes, bien qu'ils n'aient généralement pas d'impact sur leur parfum, contrairement aux diterpènes présents dans l'huile essentielle de gingembre (**Bowles, 2020**)

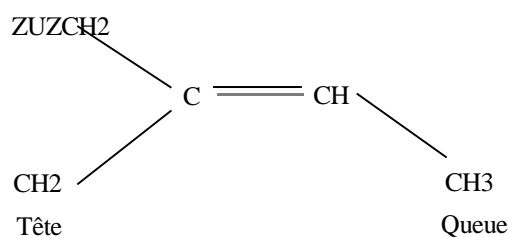


Figure 3 : Unité d'isoprène (Reza et al., 2017).

3.2. Phénylpropanoïdes

Les phénylpropanoïdes se composent d'une ou plusieurs unités C₆-C₃, où C₆ représente un cycle benzénique (Figure 4). Ils ont typiquement un groupe éther méthylique rattaché au cycle et une queue propényle (une chaîne de trois carbones avec un C = C connecté au cycle par une extrémité). Un grand nombre de phénylpropanoïdes contenus dans les HE sont des éthers ou des phénols, et dans certains cas, la chaîne latérale est réduite (C₁) (Zuzarte et al., 2012; Tisserand et Young, 2013).

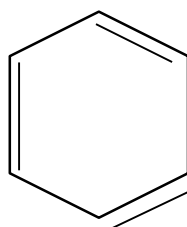


Figure 4 : Anneau aromatique (Reza et al., 2017).

4. Indicateurs de qualité des huiles essentielles

Les HEs doivent être totalement naturelles c'est à dire non altérées, entièrement pures, c'est à dire sans alcool, sans autres HE proches, sans huiles végétales et 100% intégrales c'est à dire non déterpénées, non rectifiées, non amputées. Les huiles essentielles doivent répondre à un certain nombre de critères (Koziol, 2015).

4.1. La certification botanique

Selon (Franchomme et al., 2001), l'identification précise de la plante utilisée pour produire une HE doit inclure son genre, son espèce, et idéalement sa sous-espèce. L'origine géographique, en précisant le pays ou la région, apporte des informations importantes sur le biotope, influençant directement la composition biochimique de l'huile. Le mode de culture joue également un rôle crucial : il est essentiel de savoir si la plante est sauvage ou cultivée, et si elle provient de l'agriculture biologique. Pour un usage thérapeutique, l'emploi d'HE

issues de cultures biologiques est fortement recommandé afin de garantir leur qualité et d'éviter la concentration de résidus de pesticides dans le produit final (**Franchomme et al., 2001**). Par ailleurs, le stade de développement botanique au moment de la récolte — avant, pendant ou après la floraison — peut aussi influencer sur les propriétés de l'huile essentielle.

4.2. L'organe utilisé

La composition biochimique d'une HE varie selon la partie de la plante distillée. Bien que différents organes d'une même espèce puissent contenir des HE, leur composition diffère en fonction de leur localisation dans la plante (**Franchomme et al., 2001**). Par exemple, chez l'oranger amer (*Citrus Aurantium*), le zeste (ou péricarpe frais) donne l'HE d'orange amère, également connue sous le nom d'essence de Curaçao ; la fleur fournit l'HE de Néroli, tandis que la feuille permet d'obtenir l'HE de petit grain bigaradier. Ces huiles ont des usages distincts : les feuilles possèdent des propriétés antispasmodiques, les fleurs ont des effets calmants, et les zestes agissent davantage comme neurotoniques (**Koziol, 2015**).

Les huiles essentielles peuvent être présentes dans différents organes de la plante (**Koziol, 2015**) tel que : Fleurs (bergamote), Feuilles (eucalyptus, citronnelle), Écorces (cannelle) ; bois : santal), Racines (vétiver ; rhizomes : curcuma, gingembre), Fruits (anis, badiane) Graines (muscade), Zestes (citron, agrumes en général).

4.3. Le mode d'extraction

Pour la plupart des HEs, l'extraction se fait par distillation par entraînement à la vapeur d'eau sous basse pression. Pour ce qui est des Citrus (orange amère, orange douce, citron, mandarine, bergamote, lime, pamplemousse) dont l'essence est très fragile, l'extraction de l'HE se fera par un procédé mécanique. (**Koziol, 2015**)

Le chimiotype peut être indiquée par l'analyse chromatographie en phase gazeuse Couplée au SM GC/MS.

5. Facteurs de variation des huiles essentielles

Les HEs peuvent être relâchés dès leur production ou d'abord conservés dans des structures dédiées, puis graduellement libérés depuis ces installations (**Niinemets et al., 2010 ; Harrison et al., 2013**) Cette différenciation est particulièrement pertinente pour les plantes aromatiques ayant une importante capacité de stockage et de libération de COV. Pour ces espèces, le stress peut entraîner des émissions induites par le stockage et modifier ces émissions en ajustant la vitesse de synthèse des composés volatils stockés et/ou la

perméabilité des parois cellulaires des structures de stockage (**Niinemets et al., 2010a; Copolovici et al., 2012; Grote et al., 2013**). Tout cela montre que la composition, la concentration des composants, et même le rendement d'une HE dépendent d'un ensemble de facteurs, à la fois internes à la plante (Intrinsèques) ou liés à son environnement (Extrinsèques).

Parmi les facteurs internes, on retrouve la génétique de la plante (comme l'espèce, l'écotype ou le chémotype), le type de population végétale, la partie de la plante utilisée, ainsi que le stade de développement ou la saison au moment de l'échantillonnage. Il faut également considérer les voies physiologiques et biochimiques, la physiologie globale de la plante, l'état de développement des tissus impliqués dans la synthèse et les processus métaboliques, qui jouent un rôle clé. Du côté des facteurs externes, l'environnement et les pratiques agricoles sont déterminants : les conditions climatiques, la nature de l'habitat, la date de semis, l'utilisation d'engrais, ainsi que des paramètres comme la température, l'humidité, le rayonnement solaire, le vent, la nature du sol, la localisation géographique, et les méthodes de récolte ont tous un impact. À cela s'ajoutent les techniques post-récolte, telles que le séchage, l'extraction, le temps de distillation ou encore les méthodes d'analyse employées (**Garnero, 1985**)

Il est aujourd'hui largement reconnu que les facteurs ontogénétiques, génétiques, morphogénétiques et environnementaux influencent de manière significative la biosynthèse, l'accumulation et la répartition des métabolites secondaires (**Verma et Shukla, 2015**).

5.1. Facteurs génétiques

D'après plusieurs recherches, différents paramètres peuvent influencer la teneur et la composition des HE chez différentes espèces de plantes. Il a été démontré que les facteurs génétiques, les conditions écologiques ainsi que leur interaction jouent un rôle important sur certaines propriétés des plantes aromatiques (**Pirbalouti et al., 2013**). Les chercheurs ont mis en évidence un lien entre le profil génétique des plantes et leur composition chimique, ce qui représente un point clé pour les futurs travaux de sélection et la culture de ces espèces végétales (**Liber et al., 2011**).

5.1.1. Chémotype

Même si la composition chimique d'une plante est principalement déterminée par ses gènes, son profil chimique reste généralement stable au fil des années, même dans des environnements différents. Quand ce profil reste constant, on parle alors de "chémotype" (Sadeghi et al., 2015).

Un chémotype correspond à une variante chimique d'une plante, caractérisée par des différences dans les métabolites secondaires. De petites modifications génétiques ou épigénétiques, qui n'ont souvent aucun impact visible sur l'apparence de la plante, peuvent pourtant entraîner des changements importants au niveau de sa composition chimique. En général, un chémotype est identifié par le composé chimique dominant qu'il produit. Ce concept est souvent utilisé par les spécialistes en écologie chimique et en produits naturels (Keefover-Ring et al., 2009).

L'exemple classique est le *Thymus Vulgaris*, qui existe sous plusieurs chémotypes. Bien que ces différentes formes soient visuellement très similaires, elles peuvent être classées en sept chémotypes selon le principal composé présent dans leur huile essentielle : thymol, carvacrol, linalol, géraniol, hydrate de sabinène (ou thuyanol), α -terpinéol ou eucalyptol. Par exemple, on parle de *T. vulgaris* ct. Thymol (souvent appelé thym rouge) ou *T. vulgaris* ct. géraniol (thym doux), etc. (Keefover-Ring et al., 2009).

Les chimiotypes, définis par le métabolite secondaire dominant, présentent une utilité limitée au sein d'un groupe d'organismes partageant des caractéristiques communes. En effet, les profils chimiques des individus appartenant au même chémotype peuvent varier considérablement en fonction de l'abondance des autres substances chimiques. Par conséquent, deux individus d'un même chémotype peuvent générer des effets distincts sur les herbivores, les pollinisateurs et la résistance aux ravageurs (Keefover-Ring et al., 2009).

Une étude précédente s'est penchée sur l'influence des conditions environnementales sur les rendements en HE de 15 génotypes issus de cinq espèces d'*Ocimum*, dans deux localités en Inde. Les résultats ont mis en évidence le potentiel des génotypes d'*Ocimum basilicum* pour produire des huiles riches en arômes spécifiques dans les sites étudiés (Patel et al., 2016). Par ailleurs, la diversité des chémotypes permet de cultiver le basilic en vue de répondre aux besoins du marché en composés aromatiques

ouénaturels spécifiques, comme le linalol, le méthylchavicol, le méthylcinnamate, l'eugénol, le méthyleugénol ou encore le camphre, pour leur exploitation dans le développement de produits à base de plantes d'intérêt. De plus, les rendements en huiles essentielles d'*Ocimum* varient selon les conditions écologiques, notamment en fonction de l'altitude (**Patel et al., 2016**).

5.2. Facteurs pédoclimatiques

Les conditions environnementales, en particulier pédoclimatiques, influencent de manière significative la vie des organismes vivants, notamment leur croissance et leur distribution (**Kumar et al., 2011; Ouédraogo et al., 2020**).

Les conditions pédoclimatiques peuvent influencer la distribution, le rendement et les fonctions physiologiques des végétaux, de même que les propriétés des graines (dimensions, masse, etc.) et leur composition chimique (**Singer et al., 2016; Sehgal et al., 2018**).

Effectivement, le stress (qu'il soit biotique ou abiotique) a un impact défavorable sur la quantité et la qualité de l'huile présente dans les graines, diminuant ainsi largement leur valeur économique. Les caractéristiques du sol, qui affectent l'absorption de l'eau et des nutriments, jouent un rôle crucial dans le développement des plantes et les propriétés des graines. Par ailleurs, la disponibilité en eau influence de manière significative la productivité végétale, le rendement en graines ainsi que la morphologie des graines (**Ouédraogo et al., 2020**).

6. Présentation de la famille des lamiacées

6.1. Taxonomie

La famille des lamiacées ou labiées aussi nommée labiacée, est considérée comme l'une des principales familles méditerranéennes à essences. Cette famille de plantes angiospermes dicotylédones comprend environ 258 genres et 6970 espèces, largement représentée parmi les plantes aromatiques et médicinales (**Guignard, 2000**) (**Tableau 1**).

Tableau 1 : La classification des lamiacées

Embranchement:	Plantae (Végétal)
Sous-règne:	Trachéobionta
Division:	Magnoliophyta (Spermaphytes)
Subdivision:	Angiospermes
Classe:	Magnoliopsida (Dicotylédones)
Sous-classe:	Asteridae
Famille:	Lamiaceae

6.2. Caractéristiques botaniques

Les plantes sont souvent herbacées, ou sous arbrisseaux à poils glanduleux, en général aromatiques. Leur tige est carrée, certaines espèces sont dressées, d'autres couchées portant des feuilles opposées ou verticillées. Les fleurs bisexuées, irrégulières groupées à l'aisselle des feuilles en inflorescences plus ou moins allongées ou en inflorescences terminales plus ou moins denses. Le calice est synsépale, bilabié et porte 5 à 15 nervures protubérantes. La corolle à tube très développé, avec deux lobes formant une lèvre supérieure et trois lobes formant une lèvre inférieure. Le fruit sec se séparant en quatre articles contenant chacun une graine (Quezel et Santa, 1962-1963).

6.3. Répartition et distribution

6.3.1. Dans le monde

Les plantes de la famille Lamiacée sont généralement de plantes de milieux ouverts (Spichiger et al., 2002) a reconnu six régions de grande diversité de Lamiacée, à savoir : la Méditerranée et l'Asie centrale du sud-ouest ; Afrique au sud du Sahel et Madagascar ; Chine ; Australie ; Amérique du Sud ; Amérique du Nord et Mexique.

6.3.2. En Algérie

En Algérie, 145 espèces sont répertoriées dans tous les territoires aussi bien sahariens (*Lavandula pubescens* Dec.), arides (*Zizyphora hispanica* L.) qu'humides (*Mentha aquatica* L) (Quezel et Santa, 1962) (Figure 5).

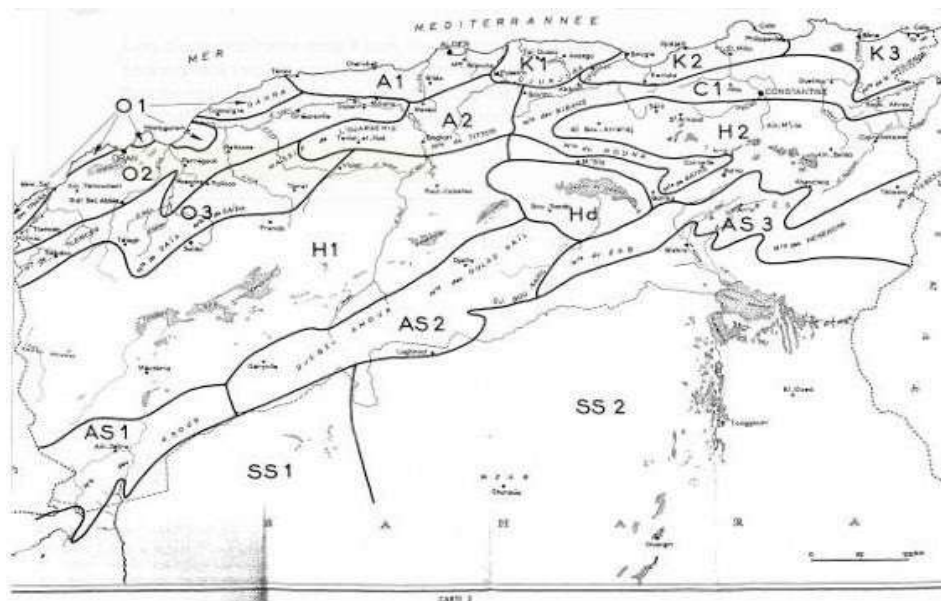


Figure 5 : Répartition géographique des lamiacées en Algérie (Quezel et Santa, 1962).

7. Présentation du genre *Thymus*

Le genre *Thymus* est un des 220 genres les plus diversifiés de la famille des labiées, avec pour centre de diversité la partie occidentale du bassin méditerranéen (Morales, 2002). Le genre *Thymus* est un élément caractéristique de la flore méditerranéenne, il regroupe plus de 300 espèces, réparties essentiellement en Eurasie et en méditerranée (Hussain, 2009). Ce genre est très répandu dans le nord-ouest africain (Maroc, Algérie, Tunisie et Libye), il pousse également sur les montagnes d’Ethiopie et d’Arabie du sud-ouest en passant par la péninsule du Sinaï en Egypte.

Le genre *thymus* permet à lui seul d’illustrer la notion de chémotype, en effet il existe plusieurs races chimiques de thym dont la composition chimique de l’HE varie suivant le biotope dans lequel elles évoluent.

L’impact des facteurs environnementaux se répercute incontestablement sur l’activité thérapeutique des HEs obtenues (Zhiri, 2005).

Les espèces de thym sont utilisées depuis l’antiquité pour leurs vertus stimulantes et toniques, elles sont recommandées contre les faiblesses organiques notamment celles du système nerveux (neurasthénie, dépression, apathie) et du système circulatoire. On leur attribue également des propriétés diurétiques, vermifuges, spasmolytiques, Antioxydants, régulatrices du cycle menstruelle, antivirales (prévient les récives d’herpès et de zona) et

Antiseptiques notamment pour lutter contre les affections respiratoires (rhumes, bronchites, angines, pneumonies, pleurésies), elles sont aussi utilisées pour calmer les toux quinteuses de la coqueluche et de l'emphysème (Mességué, 1979).

8. Importance de l'huile essentielle

8.1. Importance écologique

Les HE jouent un rôle essentiel dans la survie et le développement des plantes qui les produisent. Elles remplissent plusieurs fonctions, notamment la protection contre les prédateurs, la facilitation de la pollinisation, la défense contre les micro-organismes, la régulation de la croissance et l'adaptation aux conditions environnementales (Regnault-Roger et al., 2012 ; Tripathi et al., 2009)..

D'une part, ces huiles permettent aux plantes de se défendre contre les attaques de prédateurs comme les insectes ou certains mammifères, en agissant soit comme répulsifs, soit comme agents toxiques. Cette fonction défensive est particulièrement importante dans des milieux où les prédateurs sont abondants. D'autre part, certaines HE attirent les pollinisateurs tels que les abeilles et les papillons, ce qui favorise la reproduction des plantes par une pollinisation efficace (Regnault-Roger et al., 2012 ; Tripathi et al., 2009).

Par ailleurs, les HEs possèdent des propriétés antimicrobiennes qui protègent les plantes contre les bactéries et les champignons pathogènes, contribuant ainsi à leur bonne santé et à une croissance optimale. Elles peuvent également influencer la croissance des végétaux en limitant la germination ou le développement de plantes concurrentes. Ce mécanisme permet de réduire la compétition pour les ressources vitales telles que l'eau, les nutriments ou la lumière.

Enfin, ces composés aromatiques jouent un rôle dans l'adaptation des plantes aux conditions environnementales difficiles, comme la chaleur ou la sécheresse. Par exemple, certaines huiles peuvent réduire l'évaporation de l'eau ou protéger les feuilles contre les dommages causés par des températures extrêmes, ce qui aide les plantes à survivre dans des milieux hostiles (Chou, 1999 ; Bohren et al., 2005).

8.2. Importance économique

La production des HEs dépend fortement du type de plante et de l'espèce utilisée, ce qui entraîne une grande variabilité dans les rendements. Cette instabilité justifie le recours à une main-d'œuvre nombreuse pour assurer les différentes étapes de la chaîne de

Production, telles que l'exploitation, le transport et la transformation des matières Premières.

Par ailleurs, le marché mondial des HEs connaît une croissance constante d'année en année. Le Centre de Commerce International de Genève (1984) rapporte une progression de 200 millions de dollars sur une période de cinq ans. Cette dynamique s'explique en grande partie par l'essor de la médecine traditionnelle en Asie et par la demande croissante de produits naturels en Europe et en Amérique du Nord (**Moja et al., 2014**).



CHAPITRE II
MATÉRIELS ET MÉTHODES

Matériels et méthodes

1. Matériels végétaux

1.1. Description botanique

La plante est buissonnante (petite arbuste), à tige érigée, à feuilles lancéolées (2 à 5 fois plus longues que larges), à feuilles florales nettement plus larges. Les fleurs sont réunies à l'extrémité des rameaux en épis courts, capité, garnis de bractées ovales, lancéolées, aiguës, élargies à leur base, ciliées, ponctuées, le calice très velu coloré, à cinq dents sétacées, fortement ciliées de longs poils blanchâtres, la corolle petite, de couleur rose ou un peu purpurine, les étamines plus longues que la corolle, les anthères un peu globuleuses, à deux loges, le style presque de la même longueur que les étamines. La tige, le calice et les feuilles florales sont hérissés de poils (velu) d'où leurs répartitions en morphotype (**Figure 06**)

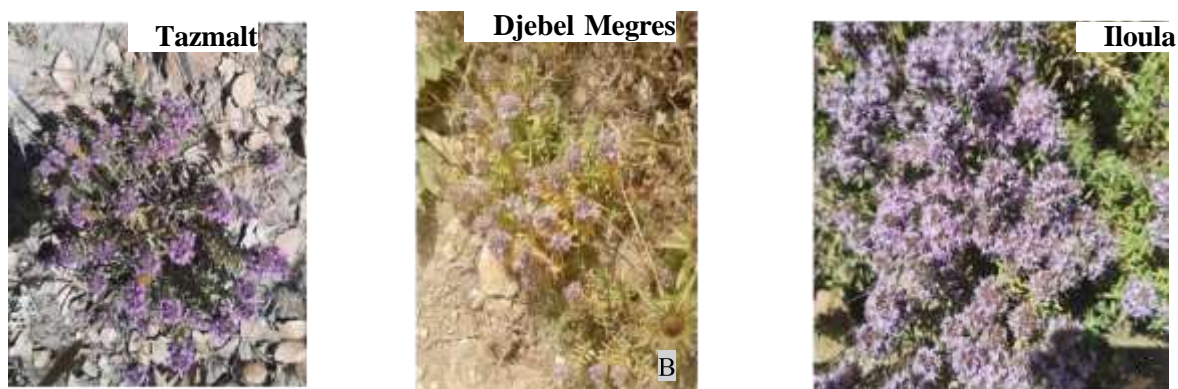


Figure 06 : Photographie des trois morphotypes de Thym étudiés

1.2. Position systématique

Le Thymus est un genre de plantes de la famille des Lamiacées. Ce sont des plantes rampantes ou en coussinet, portant de petites fleurs rose pâle ou blanches. Ces plantes sont riches en huiles essentielles et font partie des plantes aromatiques (**Tableau 2**).

Tableau 02 : Position systématique de l'espèce étudiée.

Rang	Nom scientifique
Règne	Plantae (végétal)
Sous-règne	Tracheobionta
Division	Magnoliophyta (spermaphytes)
Subdivision	Angiospermes
Classe	Magnoliopsida (Dicotylédones)

Sous-classe	Asteridae
Ordre	Lamiales
Famille	Lamiaceae
Sous-famille	Nepetoideae
Genre	Thymus
Espèce	Thymus sp

2. Echantillonnage et extraction des huiles essentielles

2.1. Echantillonnage et traitement du végétale

Des échantillons de la partie aérienne de trois morphotypes d'une espèce du genre *Thymus*, en pleine floraison, ont été prélevés dans trois habitats naturels des régions de Bejaia, de Tizi-Ouzou et de Sétif (**Tableau 3**)

Tableau 3 : Caractéristiques des sites de récolte

Station	Longitude	Latitude	Altitude
Tazmalt (Bejaia)	E 004° 25' 56.2''	N 36°27' 27.2''	1328 m
Iloula (Tizi ouzou)	E 004° 27' 58.4''	N 36° 32' 31.0''	1135 m
Djebel Megres (Sétif)	E 005° 16' 41.4''	N 36° 28' 31.9''	1557 m

Les échantillons ont été séchés à l'ombre, dans une chambre aérée, et à température ambiante. Ensuite découpées en petites parties en vue de l'extraction des HEs.

2.2. Extraction des huiles essentielles (hydrodistillation)

L'hydrodistillation (**Figure 7**) est réalisée à l'aide d'un appareil de type Clevenger. Pour cela, 100 g de matière végétale sont introduits dans un ballon de 2 L contenant une quantité suffisante d'eau distillée. Une fois le montage correctement assemblé et hermétiquement fermé, le chauffe-ballon est mis en marche avec un réglage optimal afin d'assurer une extraction stable, à une vitesse constante et contrôlée.

La vapeur d'eau entraînant les huiles essentielles est dirigée vers le condenseur. L'extraction dure environ 3 heures, jusqu'à ce que l'huile essentielle ne soit plus produite. Grâce à leur différence de densité et de couleur, l'huile essentielle est facilement séparée de l'hydrolat (eau aromatique) par décantation. Elle est ensuite séchée à l'aide de sulfate de sodium

Anhydre (Na_2SO_4), puis recueillie dans des flacons en verre brun, hermétiquement fermés, et conservée à l'abri de la lumière dans un endroit frais ($4\text{ }^\circ\text{C}$).

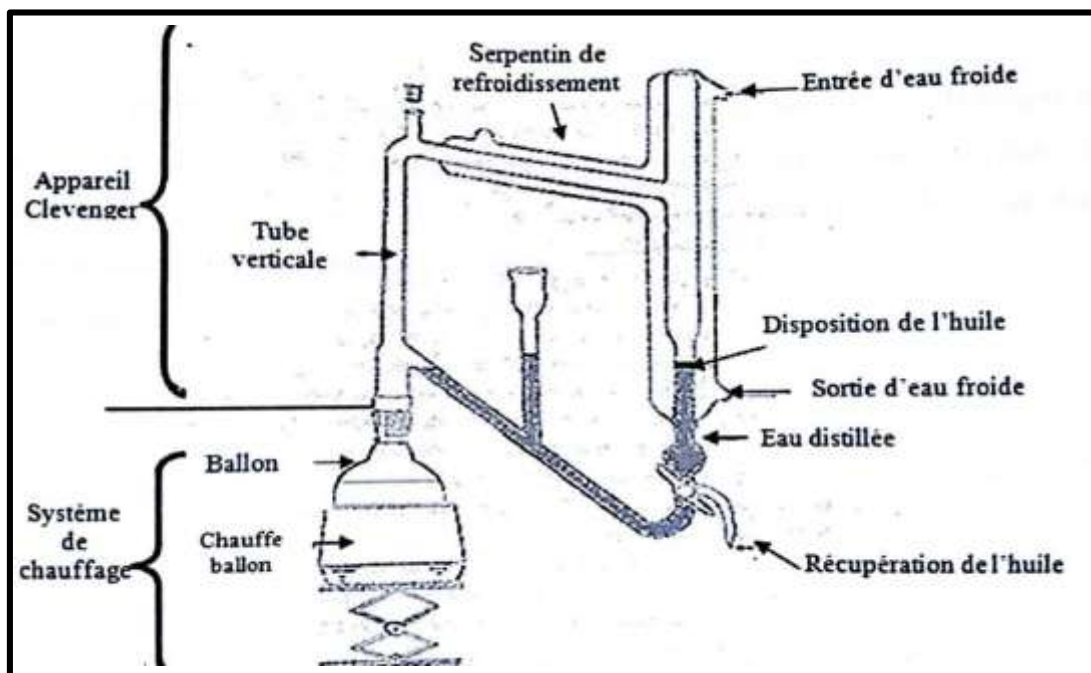


Figure 7 : Dessin schématique d'hydrodistillateur de type Clevenger.

3. Propriétés physico-chimiques

Des analyses physico-chimiques ont été effectuées sur les huiles essentielles obtenues par hydrodistillation. Ces évaluations ont porté sur plusieurs paramètres, notamment le rendement d'extraction, l'analyse organoleptique, la densité, l'indice de réfraction, l'indice d'acide, l'indice de saponification, l'indice d'iode, ainsi que le pouvoir rotatoire.

3.1. Détermination du rendement

Le rendement en huile essentielle représente le pourcentage d'huile obtenue par rapport à la masse de matière végétale utilisée. Il est exprimé en général en % (volume/poids) et calculée par la formule ci-dessous.

$$R_{\text{HE}} (\%) = \frac{P_{\text{HE}}}{P_{\text{MVS}}} * 100$$

Où :

$R_{\text{HE}} (\%)$: Rendement des HE en pourcentage,

P_{HE} : poids des HE et,

P_{MVS} : Poids de la Matière Végétale Sèche.

3.2. Analyse organoleptique

La caractérisation organoleptique d'une HE repose sur l'évaluation de son aspect (visqueuse, limpide...etc.), sa couleur (claire, jaune...etc) ainsi que son odeur (forte, agréable, piquante...etc).

3.3. La densité

Densité, ou densité relative d'une substance ou d'une HE correspond au rapport entre la masse d'un volume donné de cette substance et la masse d'un volume équivalent d'eau distillée, mesurée à une température de 20 °C à l'aide d'un pycnomètre Cette mesure est réalisée conformément à la norme AFNOR NF-T 75-111.

La densité est calculée selon la formule suivante :

$$D_{20}^{20} = \frac{m_1 - m_0}{m_2 - m_0}$$

Où :

m₀ : masse du pycnomètre vide,

m₁ : masse du pycnomètre rempli d'eau distillée et,

m₂ : masse du pycnomètre rempli d'huile essentielle.

3.4. Indice de réfraction

Les mesures de l'indice de réfraction ont été réalisées à l'aide d'un réfractomètre d'Abbe (**Figure 8**). Pour chaque huile essentielle, une goutte est déposée sur le prisme de l'appareil, puis la lecture est effectuée une fois la température stabilisée. Lorsque la détermination est faite à une température différente de 20 °C, l'indice de réfraction est corrigé à l'aide de la formule suivante :

$$n = n' + 0.004 (t' - 20)$$

Où :

n' : indice de réfraction mesuré,

n : indice de réfraction corrigé et,

t' : température ambiante au moment de la mesure.



Figure 8 : Photographie du réfractomètre d'Abbe

3.5. Pouvoir rotatoire

Le pouvoir rotatoire est un critère très important pour déterminer la pureté des huiles essentielles et permet d'indiquer si elles possèdent une activité optique dextrogyre ou lévogyre. Elle est obtenue à l'aide d'un polarimètre de Laurent (**Figure 9**). Pour déterminer le pouvoir rotatoire on doit d'abord remplir le tube avec 20 ml d'éthanol, en s'assurant qu'il ne reste aucune bulle d'air interposée, on place le tube dans le polarimètre et on lit l'angle de rotation α_0 . Ensuite on dilue l'huile essentielles à 50 μ l /20 ml d'éthanol et on lit l'angle de rotation de l'échantillon sur l'échelle de l'appareil. Le pouvoir rotatoire est calculé par la loi de Biot :

$$\alpha_D^{20} = \frac{\alpha}{i \cdot c}$$

Avec :

α_D^{20} : Pouvoir rotatoire spécifique,

α : pouvoir rotatoire de la solution en degrés ($^\circ$),

i : la longueur de la cuve en décimètre (dm) et,

c : la concentration de la solution en gramme par millilitre (g.mL⁻¹).



Figure 9 : Photographie du polarimètre de Laurent

3.6. Indice d'acide

Le nombre de milligrammes de l'hydroxyde de potassium requis pour neutraliser les acides libres dans 1 g d'huile essentielle (ISO 1242-1999). Cet indice est mesuré à l'aide d'un mélange d'huile essentielle, l'éthanol et des gouttes de phénophtaléine. Ce mélange formé est titré par la suite avec une solution alcoolique de potasse (KOH) de titre connu.

Pour calculer l'indice d'acide on utilise la formule suivante :

$$I_a = 56.11 * \frac{V \cdot C}{m}$$

Où:

I_a : indice d'acide,

V : volume en ml de la solution de KOH utilisé pour le titrage,

C : concentration en mol/L de la solution de KOH et,

m : la masse en gramme de la prise d'essai.

3.7. Indice d'ester

L'indice d'ester est le nombre de milligrammes d'hydroxyde de potassium nécessaire à la neutralisation des acides libérés par l'hydrolyse des esters contenus dans 1 g d'huile essentielle (ISO 709-2001). La détermination s'effectue à l'aide de quelque pierre de ponce, un réfrigérant, l'eau distillée et des gouttes de phénolphtaléine, puis l'excès de KOH est titré avec une solution d'HCL (0.5N). Cet indice est calculé par le biais de la formule suivante :

$$I_e = \frac{28.0}{m} * (V_0 - V_1) - I_a$$

Où :

I_e : indice d'ester,

m : masse en gramme de la prise d'essai,

V_0 : volume en ml de la solution de HCL mesuré pour l'essai à blanc,

V_1 : volume en mm de la solution d'HCL mesuré pour le calcul de I_e et,

I_a : valeur de l'indice d'acide.

3.8. Indice de peroxyde

C'est la quantité de peroxyde présent dans l'échantillon, exprimée en milliéquivalents d'oxygène actif contenu dans un kilogramme de produit, oxydant l'iodure de potassium avec libération d'iode. L'indice de peroxyde nous permet d'évaluer l'état de fraîcheur de l'huile. Cet indice est déterminé avec du chloroforme, l'acide acétique, une solution de KI saturé, de l'eau distillée et des gouttes d'emploi d'amidon. l'iode libéré est titré avec une solution de thiosulfate de sodium $Na_2S_2O_3$ (0.01 N). Cet indice est calculé par la formule suivante :

Où :

I_p : indice de peroxyde,

V_0 : volume (en mL) de la solution de thiosulfate de sodium utilisé pour l'essai à blanc,

V_1 : volume (en mL) de la solution de thiosulfate de sodium utilisé pour l'échantillon,

P : prise d'essai en gramme.

3.9. Indice de saponification

L'indice de saponification (I_s) est le nombre en milligrammes de (KOH) nécessaire pour transformer en savon les acides gras et les triglycérides d'un gramme de corps gras. Pour calculer l'indice de saponification on utilise la formule suivante :

$$I_s = I_e + I_a$$

Où :

I_s : indice de saponification,

I_e : indice d'ester et,

I_a : indice d'acide.

3.10. Indice d'iode

L'indice d'iode est le nombre de grammes d'iode fixé par 100 g de corps gras. Il est déterminé suivant la norme NF ISO 3961. Cet indice est déterminé par la méthode Wijs en deux parties, la première partie consiste à préparer un mélange d'huile essentielle, le réactif de Wijs, et une solution d'iode, la deuxième partie consiste à ajouter au mélange une solution d'iodure de potassium à 10% et l'eau distillée, par la suite l'excès d'iode est titré par une solution de thiosulfate de sodium (0.5 N) en présence d'empois d'amidon. Il est calculé par la formule suivante :

$$I_i = N \frac{(V_0 - V_1)}{m}$$

Où :

N : normalité de l'acide chlorhydrique (HCl),

V₀ : volume en ml de la solution d'acide chlorhydrique utilisé pour l'essai à blanc,

V₁ : volume en ml de la solution d'acide chlorhydrique utilisé pour l'essai et,

m : poids en gramme de la prise d'essai.

4. Analyses physico-chimiques des sols :

Les sols retenus à l'étude ont été prélevés dans les trois stations suivantes ; Tazmalt, Megres, et Iloula, situés dans les régions de Béjaia, Sétif et Tizi-Ouzo. Ils ont été analysés au niveau de laboratoire de Biologie des sols de la FSNV de l'université A/Mira Béjaia.

Les échantillons des 3 sols destinés à l'analyse physico-chimique sont soumis à différents traitements : séchage à l'air libre, réduction des mottes de telle sorte à ne pas détruire les agrégats du sol, tamisage sur tamis à mailles carrées de 2mm et mise en conservation dans des flacons scellés.

Les analyses physico chimiques ont porté sur l'analyse granulométrique, la salinité du sol à travers la mesure de la conductivité électrique (CE), le pH, le dosage de l'azote totale, le dosage du phosphore assimilable (Olsen), les bases échangeables (Ca²⁺ et Mg²⁺) par complexométrie, le carbone (ANNE modifiée), le dosage du K⁺ et Na⁺ par le photomètre à flamme, et le calcaire par le calcimètre de Bernard.

4.1. Analyses granulométriques :

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la texture du sol par la méthode à la pipette de robinson cette méthode est basée sur la destruction totale de la matière de l'eau

oxygénée à 20 volumes, dispersion des agrégats par le pyrophosphate de sodium à 40%, remise en suspension, prélèvement après un temps de sédimentation des particules fines de diamètre $< 2 \mu\text{m}$ (argiles et limons) à la pipette de robinson selon la loi de sédimentation de Stockes et récupération des fractions grossières de diamètre $> 50\mu\text{m}$ (Sables grossiers, Sables fins, Limons grossiers) par tamisage (**Figure 10**) après élimination des fractions fines (Argiles + Limons fins) par une série de siphonage. Enfin La détermination de la texture se fait par la projection des pourcentages des différentes fractions sur le triangle des textures (U.S.D.A).



Figure 10 : Photographie d'une tamiseuse automatique avec des tamis de différents diamètres.

4.2. Le PH du sol :

La mesure du pH a été réalisée par la méthode électrométrique (**Figure 11**) à l'aide d'un pH mètre de paillasse à électrode de verre sur une suspension de terre fine dont le rapport sol/eau = 1/2.5, après 1 heure d'agitation puis décantation. Deux mesures de pH sont effectuées : pH_{eau} et pH_{KCl} .



Figure 11 : Photographie du pH mètre de paillasse

4.3. Conductivité électrique :

La conductivité électrique a été mesurée à l'aide d'un conductimètre (**Figure 12**) sur une suspension de terre fine dont le rapport sol/eau = 1/5. La CE du sol est exprimé en microsiemens par centimètre ($\mu\text{s}/\text{cm}$).



Figure 12 : Photographie du conductimètre de pailleuse

4.4. Dosage du carbone organique :

Le carbone organique est dosé par la méthode Anne modifiée de 1945 (**Figure 13**). Le carbone du sol est oxydé à chaud par du bichromate de potassium en milieu sulfurique. L'excès de bichromate de potassium est titré par une solution de sel de Mohr de titre connu en présence de diphénylamine (**Aubert, 1978**). La matière organique est déterminée par la formule suivante :

$$\text{MO (\%)} = \text{C (\%)} * 1.724$$



Figure 13 : Photographie du montage de l'appareillage du dosage du carbone (Anne modifiée)

4.5. Dosage de l'azote total :

Les teneurs en azote total du sol sont déterminées par la méthode classique de Kjeldahl. Cette méthode consiste en une minéralisation (**Figure 14-A**) de la matière organique à chaud par de l'acide sulfurique concentré (H_2SO_4) en présence d'un catalyseur renfermant du sélénium. L'azote ammoniacal NH_4^+ est déplacé de sa forme combinée par l'addition de soude, après distillation (**Figure 14-B**) grâce à l'appareil de distillation UDK 142 (VELP). L'ammonium libéré est recueilli dans une solution d'acide borique que l'on dose avec H_2SO_4 de titre connu.



Figure 14 : Photographie des appareils de minéralisation et de distillation de l'azote

4.6. Dosage du phosphore assimilable :

Le phosphore assimilable est déterminé par la méthode **Joret-Hebert (1955)**, dans le sol, par spectrophotométrie à une longueur d'onde 650 nm, en présence de l'oxalate d'ammonium, une solution du phosphate monopotassium, le sulfomolybdique et l'acide ascorbique. Une gamme étalon est réalisée en parallèle et la lecture de la densité optique (DO) à 650 nm est faite à l'aide d'un spectrophotomètre (**Figure 15**). Les teneurs du phosphore du sol sont déterminées à partir d'une courbe étalon, puis exprimées en ppm.



Figure 15 : photographie du spectrophotomètre UV-visible

4.7. Dosage du Ca^{2+} et Mg^{2+} :

Les teneurs du sol en Ca^{2+} et Mg^{2+} échangeables sont déterminées par Complexométrie à l'EDTA sur le percolât obtenu par extraction à l'acétate d'ammonium (pH = 7, 1N) (Aubert, 1978).

4.8. Dosage du K^{+} et Na^{+} :

Les teneurs du sol en K^{+} et Na^{+} ont été mesurées par le photomètre à flamme (**Figure 16**) à partir du percolât obtenu à l'acétate d'ammonium.



Figure 16 : photographie du photomètre à flamme

5. Les données climatiques

Pour déterminer les conditions climatiques dans la région, nous avons utilisé la température moyenne mensuelle maximale et minimale (T_{\max} , T_{\min}), les Précipitations moyennes (mm), l'indice de gravité de la sécheresse de Palmer (PDSI), et l'indice de l'évapotranspiration potentielle (PET) sur la période 1990-2024. Les données mensuelles de T_{\max} , Pr, PET et PDSI ont été obtenues à partir de TerraClimate (**Abatzoglou et al., 2018**) avec une résolution spatiale maillée de $\sim 4,5$ km à l'aide de Google Earth Engine. Le PET est la quantité d'eau qui serait évaporée et transpirée par une culture, un sol ou un écosystème spécifique s'il y avait suffisamment d'eau disponible. Le PDSI est un indice normalisé basé sur un bilan hydrique simplifié du sol et estime les conditions d'humidité relative du sol, il intègre les précipitations antécédentes, l'offre d'humidité et la demande d'humidité (**Palmer, 1965**). L'ampleur de l'indice PDSI indique la gravité de l'écart par rapport aux conditions normales. Une valeur PDSI > 4 représente des conditions très humides, tandis qu'une valeur PDSI < -4 représente une sécheresse extrême.

5.1. Indice de thermicité (I_t)

L'indice de thermicité (I_t) est basé sur la température moyenne annuelle (**T**), la température moyenne minimale du mois le plus froid (**m**) et la température moyenne maximale du mois le plus chaud de l'année (**M**).

Cet indice se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$I_t = (T + m + M) * 10$$

5.2. Indice de continentalité (I_c)

L'indice de continentalité (I_c) est la différence entre la température moyenne du mois le plus chaud de l'année (T_{max}) et la température moyenne du mois le plus froid de l'année (T_{min}). Cet indice se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$I_c = T_{max} - T_{min}$$

5.3. Indice ombrothermique (I_o)

Il permet de classer les bioclimats en fonction de leur aridité, il se base sur le rapport de précipitation en millimètre des mois dont les températures moyenne supérieurs à 0 °C (P_p), sur la somme des températures moyennes des mois dont les températures sont supérieures de 0°C (T_p). Cet indice est déterminé par la formule suivante :

$$I_o = \frac{P_p}{T_p}$$

5.4. Indice ombrothermique d'été (I_{ov})

L'indice ombrothermique d'été (I_{ov}) représente le rapport entre les précipitations estivales en millimètres des trois mois consécutifs les plus chauds de l'année (P_{pv}) et la somme des températures moyennes des mois consécutifs les plus chauds de l'année (T_{pv}). Cet indice se calcule par la formule suivante :

$$I_{ov} = \frac{P_{pv}}{T_{pv}}$$

5.5. Température positive annuelle (T_p)

La température positive annuelle (T_p) correspond à la somme des températures moyennes des mois dont la température est supérieure à 0 °C.

5.6. Température annuelle négative (T_n)

La température annuelle négative (T_n) correspond à la somme des températures moyennes des mois dont la température moyenne est inférieure à 0 °C.

5.7. Température d'été (T_v)

La température d'été (T_v) est la somme des températures moyennes des mois d'été dont la température est supérieure à 0°C.

5.8. Précipitation positive (P_p)

Les précipitations positives (P_p) représentent les précipitations annuelles en millimètres des mois dont la température moyenne est supérieure à 0 °C.

5.9. Précipitations d'été (P_v)

Les précipitations d'été (P_v) correspondent à la somme des précipitations moyennes des trois mois les plus chauds de l'année, exprimée en millimètres.

6. Analyse statistique des données

Les résultats obtenus lors des expériences ont été soumis à une analyse statistique par le biais de l'analyse de variance (ANOVA) à un facteur. Les comparaisons des moyennes ont été réalisées en utilisant le test post-Hoc de Newman-Keuls (SNK). Des corrélations et une analyse en composantes principales (ACP) ont été effectuées sur les résultats pédoclimatiques ainsi que sur les propriétés physico-chimiques des huiles essentielles (HE) afin de prédire et d'expliquer les variations qualitatives et quantitatives de ces extraits. Toutes ces analyses ont été réalisées à l'aide du logiciel XL Stat 2022 (version 4.1).



CHAPITRE 3
RÉSULTATS ET DISCUSSION

Résultats & discussion

1. Rendement et caractéristique organoleptique

L'hydrodistillation des parties aériennes fleuries des différents morphotypes de l'espèce étudiée a fourni des huiles essentielles ayant des mêmes colorations qui sont jaune clair avec de fortes et persistantes odeurs (**Tableau 4**). Les rendements en HE sont illustrés sur la (**Figure 17**).

Tableau 4 : caractéristiques organoleptiques de l'huile essentielle des Thyms étudiés

Huiles essentielles	Aspect	Couleur	Odeur
Iloula	Liquide	Jaune claire	Forte, odeur de citronnelle
Tazmalt	Liquide	Jaune claire	Forte, odeur de citronnelle
Sétif (Djebel Megres)	Liquide	Jaune claire	Forte, odeur de citronnelle

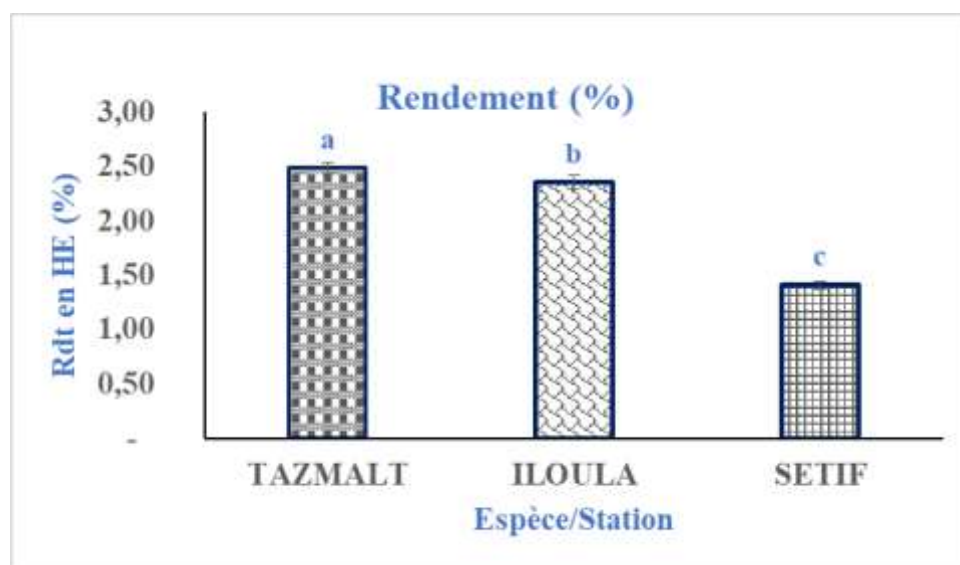


Figure 17 : Rendement en He des différents morphotypes de thym étudié

Les moyennes partageant aucune lettre sont significativement différentes ($p \leq 0,05$)

Les valeurs obtenues représentent la moyenne des rendements en huiles essentielles issues de trois extractions indépendantes par morphotype, exprimées en grammes d'HE par gramme de matière végétale sèche. Ces rendements ont été soumis à une analyse de variance à un facteur (ANOVA à 1 facteur), suivie d'un test de comparaison des moyennes par le test

De Student-Newman-Keuls (SNK), à l'aide du logiciel XLSTAT version 22. Les différences ont été considérées comme statistiquement significatives au seuil de $P \leq 0,05$.

Les rendements obtenus se répartissent en trois groupes distincts, avec des différences significatives pour les sites de récolte. Le premier groupe comprend l'HE extraite du morphotype de Tazmalt avec un rendement moyen de (2,49 %), soit la valeur la plus élevée enregistrée pour cette espèce de thym.

Le second groupe regroupe les morphotypes récoltés à Iloula avec une moyenne de (2,36%). Et enfin le troisième groupe qui correspond à l'HE extraite de Djebel Megres à Sétif, avec une valeur nettement faible (1,41%) par rapport aux deux morphotypes précédents.

D'après la littérature scientifique, il est bien reconnu que le genre *Thymus* est riche en HE. En comparant les rendements obtenus au cours de notre étude avec ceux mentionnés dans d'autres travaux, les observations suivantes ont été dégagées :

- Les résultats de la production quantitative en HE des trois morphotypes de thym étudiés sont du même ordre de grandeur que les études rapportées par (**Benbouali, 2006., Aomari et Sehaki, 2018**) pour les huiles essentielles de *Thymus vulgaris* récolté dans différentes régions d'Algérie. Des rendements beaucoup meilleurs ont été obtenus avec la partie aérienne de *Thymus ciliatus* de la région de Djelfa (Algérie), avec des teneurs de l'ordre de 2,3% (**Souadia, 2022**).

- Les variations de rendement en huile essentielle d'un organe végétal à un autre ou d'une espèce à un autre est bien documentées dans la littérature. Plusieurs facteurs peuvent influencer de manière significative la quantité d'huile essentielle extraite, notamment l'origine géographique de la plante, le stade phénologique lors de la récolte, la nature de l'organe utilisé, les conditions de séchage ainsi que la technique d'extraction employée (**Bounatirou et al., 2007; Burt, 2004; Gharzouli et al., 2020**). Par ailleurs, d'autres paramètres liés au traitement préliminaire de la matière végétale, tels que le broyage, l'écrasement, ou encore certaines conditions physiques appliquées durant l'hydrodistillation (pression, température, agitation), peuvent également influencer sur le rendement final et les caractéristiques chimiques de l'huile essentielle obtenue (**Jouyban et al., 2005**).

2. Propriétés physicochimiques des huiles essentielles

Selon les recommandations établies par les pharmacopées européennes, les normes ISO, AFNOR ainsi que les directives internationales relatives aux huiles essentielles, les contrôles

physico-chimiques s'avèrent essentiels pour garantir leur qualité. Ces analyses sont fondamentales non seulement pour assurer la sécurité durant le transport et le stockage, mais également pour protéger le consommateur et garantir la fiabilité des échanges commerciaux. L'évaluation de la qualité repose sur divers paramètres, notamment des caractéristiques physiques et organoleptiques (couleur, odeur, goût, viscosité, densité, indice de réfraction, pouvoir rotatoire, point d'éclair, etc.), des analyses chimiques (indice d'acide, d'ester, de saponification, de carbonyle, de peroxyde, ainsi que certains dosages spécifiques), sans oublier les analyses chromatographiques et spectroscopiques qui permettent une caractérisation fine du profil moléculaire de l'HE (Boukhatem *et al.*, 2013).

Les résultats des caractéristiques physicochimiques étudiées sont regroupés dans le **Tableau 5** ci-après.

Tableau 5 : Propriétés physicochimiques des huiles essentielles des trois morphotypes de thym étudiés

HE/Station	Densité	Indice d'acide	Indice d'iode	Indice d'ester	Indice de saponification
Thym-Tazmalt	0,88 ± 0,03 ^a	5,17 ± 0,20 ^a	6,96 ± 0,50 ^b	7313,55 ± 49,12 ^b	7318,73 ± 50,01 ^b
Thym-Iloula	0,91 ± 0,01 ^a	4,57 ± 0,11 ^b	7,25 ± 0,13 ^{ab}	7482,56 ± 17,61 ^a	7486,36 ± 17,60 ^a
Thym-Sétif	0,84 ± 0,01 ^b	2,99 ± 0,04 ^c	7,96 ± 0,50 ^a	7353,73 ± 3,70 ^b	7356,21 ± 3,63 ^b

Les moyennes ne partagent pas la même lettre, dans la même colonne, sont statistiquement différentes

L'analyse des données présentées dans le tableau ci-dessus, révèle que les caractéristiques physicochimiques des HEs obtenues se situent globalement dans les limites des normes de commercialisation généralement admises par les organisations de normalisation. Ces propriétés varient en fonction de la station de récolte.

La densité relative oscille entre 0,8 pour le Thym récolté à Tazmalt et pour celui d'Iloula (0,91), tandis que le Thym provenant de Sétif présente une densité plus faible, estimée à 0,84. Ces résultats corroborent ceux rapportés pour d'autres HEs de plantes

aromatiques méditerranéennes (**Boutekedjiret et al., 2003 ; Djerrad et al., 2015 ; Hassani et al., 2019**).

Pour l'indice de réfraction, la littérature scientifique mentionne l'influence principale de la composition chimique de l'HE sur cet indicateur de la qualité physique, en particulier la teneur en monoterpènes et en composés oxygénés. Une forte concentration en monoterpènes tend à élever cet indice, traduisant une plus grande capacité à réfracter la lumière (**Raal et al., 2012 ; Kouidri et al., 2020**). En ce qui concerne le pouvoir rotatoire, les huiles analysées montrent une déviation positive de la lumière polarisée, avec des valeurs comprises entre +4,25 et +4,35, indiquant une activité optique dextrogyre.

L'évaluation de la qualité des HEs repose sur une série d'analyses physicochimiques indispensables. Ces contrôles sont essentiels non seulement pour assurer la sécurité durant le transport et le stockage, mais également pour protéger les consommateurs et garantir la transparence et la fiabilité des échanges commerciaux. Comme illustré dans le Tableau 6, ces analyses incluent des paramètres qualitatifs tels que l'indice d'acide, l'indice d'ester, l'indice de saponification et l'indice d'iode. À cela s'ajoutent d'autres critères déterminants pour juger de la qualité de l'HE, notamment l'indice de carbonyle, l'indice de phénol, certains dosages spécifiques ainsi que les profils chromatographiques et spectroscopiques. Ces approches analytiques sont couramment utilisées dans les études de caractérisation des HEs (**Boutekedjiret et al., 2003 ; Adams, 2007**).

L'indice d'acide observé pour l'ensemble des HEs analysées est relativement élevé, avec des valeurs comprises entre 2,99 et 5,17. Cette élévation peut être attribuée à la présence d'acides libres ou au processus d'hydrolyse des esters, potentiellement survenue lors du stockage à basse température (4 °C). En revanche, l'indice de peroxyde s'est révélé indétectable pour les HE extraites des échantillons de Thym issus des trois stations d'étude. Ce résultat pourrait s'expliquer par une conservation adéquate des HEs, les protégeant ainsi de l'exposition à l'air et aux phénomènes d'oxydation. Selon les recommandations du Codex Alimentarius, l'indice de peroxyde ne devrait pas dépasser 10 milliéquivalents de peroxyde par kilogramme (10 mEq O₂/kg) pour les huiles végétales vierges ou obtenues par pression à froid. Toutefois, cette limite s'applique principalement aux huiles alimentaires, et non spécifique aux HEs, dont les propriétés chimiques diffèrent. L'indice de peroxyde reste néanmoins un paramètre important pour évaluer l'état d'oxydation et la stabilité chimique des huiles essentielles (**Silva et al., 2019 ; Aziz et al., 2020**).

Concernant les autres paramètres physicochimiques évalués, les HEs analysées présentent des valeurs relativement élevées, en particulier pour les indices d'ester et de saponification, dépassant les seuils définis par les normes AFNOR pour ce type de composés. Une teneur élevée en esters est généralement associée à des HEs de haute qualité, indiquant une absence de dégradation oxydative importante avant l'analyse. Par ailleurs, les valeurs élevées de l'indice de saponification observées traduisent une prédominance d'acides gras à chaîne courte parmi les constituants lipophiles des HEs. En effet, plus la chaîne carbonée est courte, plus l'indice de saponification est élevé, ce qui constitue un indicateur indirect de la composition moléculaire des corps gras (Salvador *et al.*, 2001 ; co *et al.*, 2012). À l'inverse, l'indice d'iode, qui renseigne sur le degré d'insaturation des acides gras, affiche des valeurs comprises entre 6,69 et 7,96, se situant dans les limites admises par les normes AFNOR pour les HEs. Ce paramètre permet d'évaluer la susceptibilité des HEs à l'oxydation en fonction de la présence de doubles liaisons dans leurs chaînes carbonées (Codex , 2019).

3. Analyse des paramètres des sols

L'analyse du sol permet d'une part d'identifier ses propriétés physiques, ce qui renseigne sur sa capacité à libérer et à fournir les éléments minéraux nécessaires à la croissance des plantes. D'autre part, elle vise à déterminer la composition chimique du sol, notamment sa richesse en éléments nutritifs essentiels à la fertilité (Brady *et Weil.*, 2010).

Les propriétés physiques du sol dépendent à la fois de la nature et de la proportion de ses différents constituants, autrement dit de sa texture, ainsi que de leur organisation spatiale, définissant ainsi sa structure. Elles sont également influencées par la quantité d'eau présente dans les pores du sol et par son état physique.

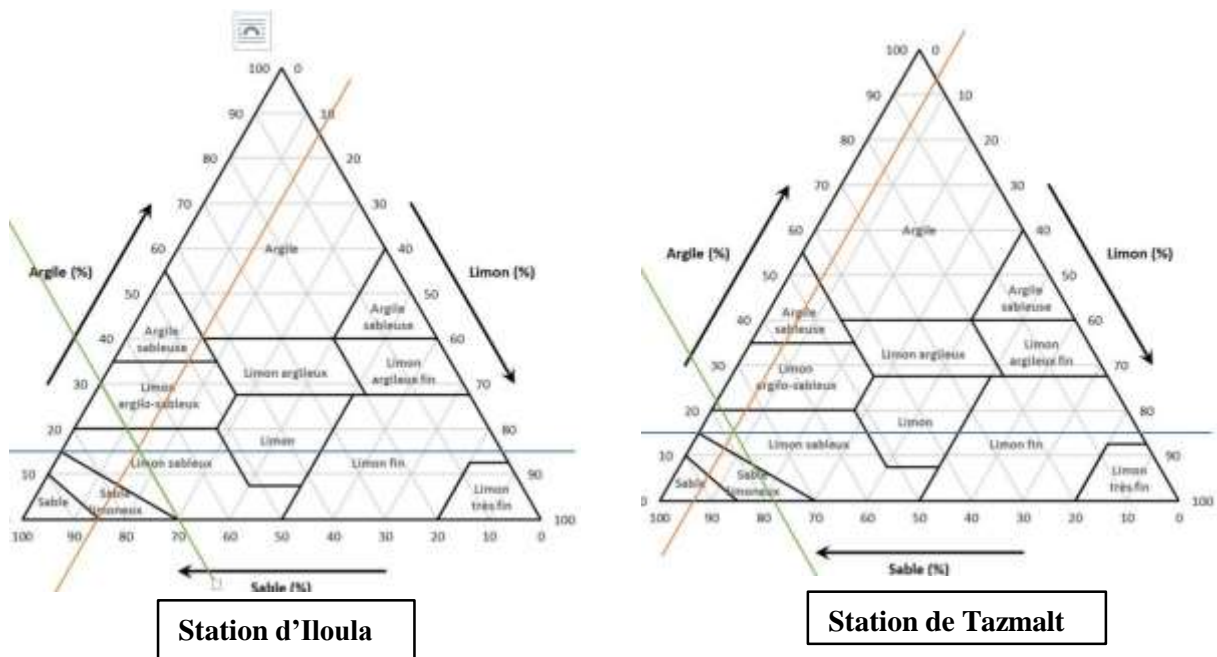
Le Tableau 5 présente les résultats des analyses des propriétés physiques des sols sur lesquels on a prélevé les différents morphotypes de Thym. Les données obtenues ont été soumises à une analyse de variance à un facteur (ANOVA à 1 facteur), suivie d'une comparaison des moyennes par le test de Student-Newman-Keuls (SNK), à l'aide du logiciel XLSTAT version 22.

Tableau 6 : Propriétés physiques des sols étudiés

Paramètres Stations	Sables	Limons	Argiles	Texture
Iloula	69,97 ± 8,32 ^{ab}	14,98 ± 11,73 ^a	15,05 ± 6,05 ^a	Limoneux sableux
Tazmalt	77,70 ± 4,62 ^a	6,99 ± 3,30 ^a	15,31 ± 2,39 ^a	Limoneux sableux
Megres	60,17 ± 1,32 ^b	24,91 ± 6,12 ^a	14,92 ± 5,78 ^a	Limoneux sableux

Les moyennes ne partagent pas la même lettre, dans la même colonne, sont statistiquement différentes

L’analyse granulométrique permet d’évaluer la répartition des particules du sol selon leur taille. La classification des éléments en « argile », « limon » et « sable » repose uniquement sur la dimension des particules, indépendamment de leur composition chimique. Cette analyse permet ainsi de définir la texture du sol. Dans ce contexte, les sols des régions d’Iloula et de Tazmalt et de Sétif présentent la même texture (limoneuse-sableuse) (**Figure 18**). La forte teneur en limons dans les trois sols suggère une susceptibilité de ces sols au phénomène de battance (**Duchaufour, 2001**).



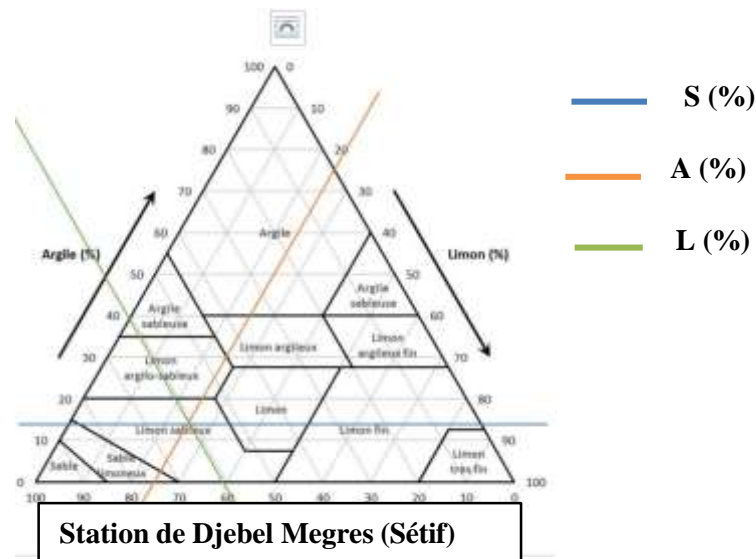


Figure 18 : les triangles de texture USDA des sols étudiés

L'analyse statistique (ANOVA à un facteur) a mis en évidence un effet de répartition très dispersée entre les pourcentages des particules constituant les sols étudiés. Aucune différence significative n'a été observée pour les trois échantillons de sol analysés. Les résultats obtenus sont les suivants : sables ($F = 7,5252$; $p > 0,0232$; $ddl = 2$), limons ($F = 3,9031$; $p > 0,0821$; $ddl = 2$) et argiles ($F = 0,0047$; $p > 0,9953$; $ddl = 2$). Le test SNK n'a révélé aucun regroupement pour les pourcentages des particules des sols analysés, excepté ceux des sables où les sols de Tazmalt et de Sétif se singularisent par des pourcentages statistiquement différents.

Par ailleurs, l'étude du complexe adsorbant des sols, basé sur la présence des ions Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ , révèle de faibles concentrations en calcium et magnésium, ce qui pourrait engendrer des carences minérales chez les morphotypes de Thym étudiés. En revanche, les teneurs en sodium (25 à 20 ppm) et en potassium (0,25 à 0,10 ppm) sont relativement faibles. Ces concentrations s'inscrivent dans les plages de fertilité acceptables pour les sols, et pourraient contribuer à expliquer la variabilité qualitative et quantitative des HEs extraites (**Figure 19**).

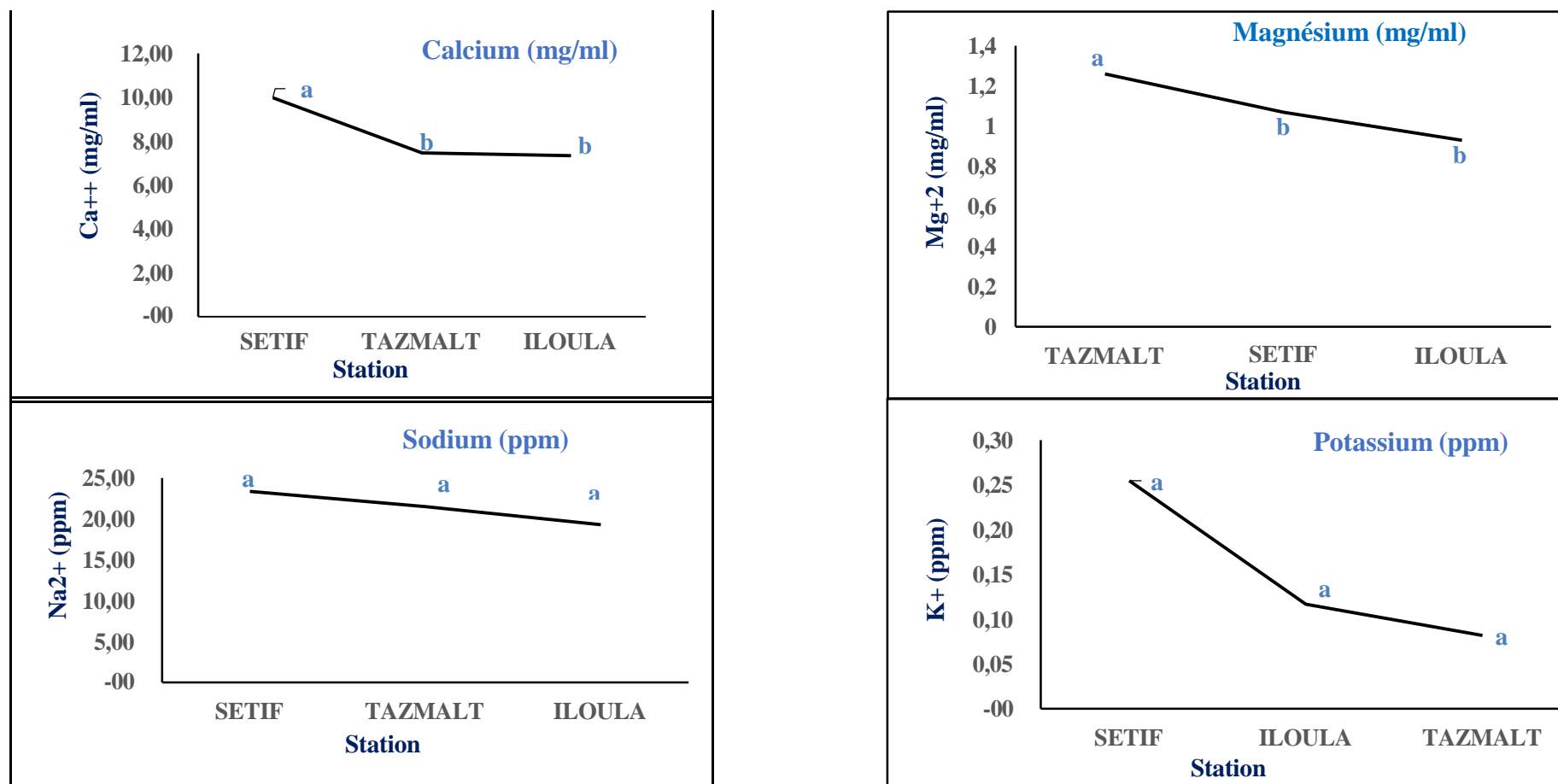


Figure 19 : Evolution spatiale des propriétés physico-chimiques des sols étudiés

(Sur les figures précédentes, les moyennes ne partageant aucune lettre sont significativement différentes ($p \leq 005$))

Outre les cations échangeables, les sols contiennent également des ions H⁺ libres en solution. Leur concentration peut être déterminée à l'aide de méthodes spécifiques, ce qui permet de mesurer le pH du sol, exprimé sur une échelle allant de 1 à 14. Toutefois, la gamme de pH généralement observée dans les sols se situe dans les environs de 7. L'analyse de variance réalisée a permis de distinguer un seul groupe distinct selon les valeurs de pH enregistrées. Ce groupe représenté par tous les échantillons de sol étudiés, avec un pH dans l'intervalle de neutralité dont la borne inférieure délimite la concentration des ions H⁺ contenue dans la solution du sol d'Iloula (pH = 7,14) et limite supérieure délimité un pH dont les valeurs avoisinent l'alcalinité, notamment pour les sols de Tazmalt avec un pH de l'ordre de 7,53 et de Sétif, avec un pH=7,55.

De plus, la concentration en sels solubles des sols étudiés a été estimée par la mesure de la conductivité électrique, qui permet d'évaluer leur niveau de salinité. Les valeurs relevées varient de 94,4 $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ (Sétif) à 286,44 $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ (Tazmalt). Selon l'échelle de Durand (1983), ces valeurs classent les sols dans la classe I, correspondant aux sols non salés. Ainsi, leur salinité est considérée comme négligeable et n'a pas d'effet défavorable sur la croissance des cultures (**Figure 20**).

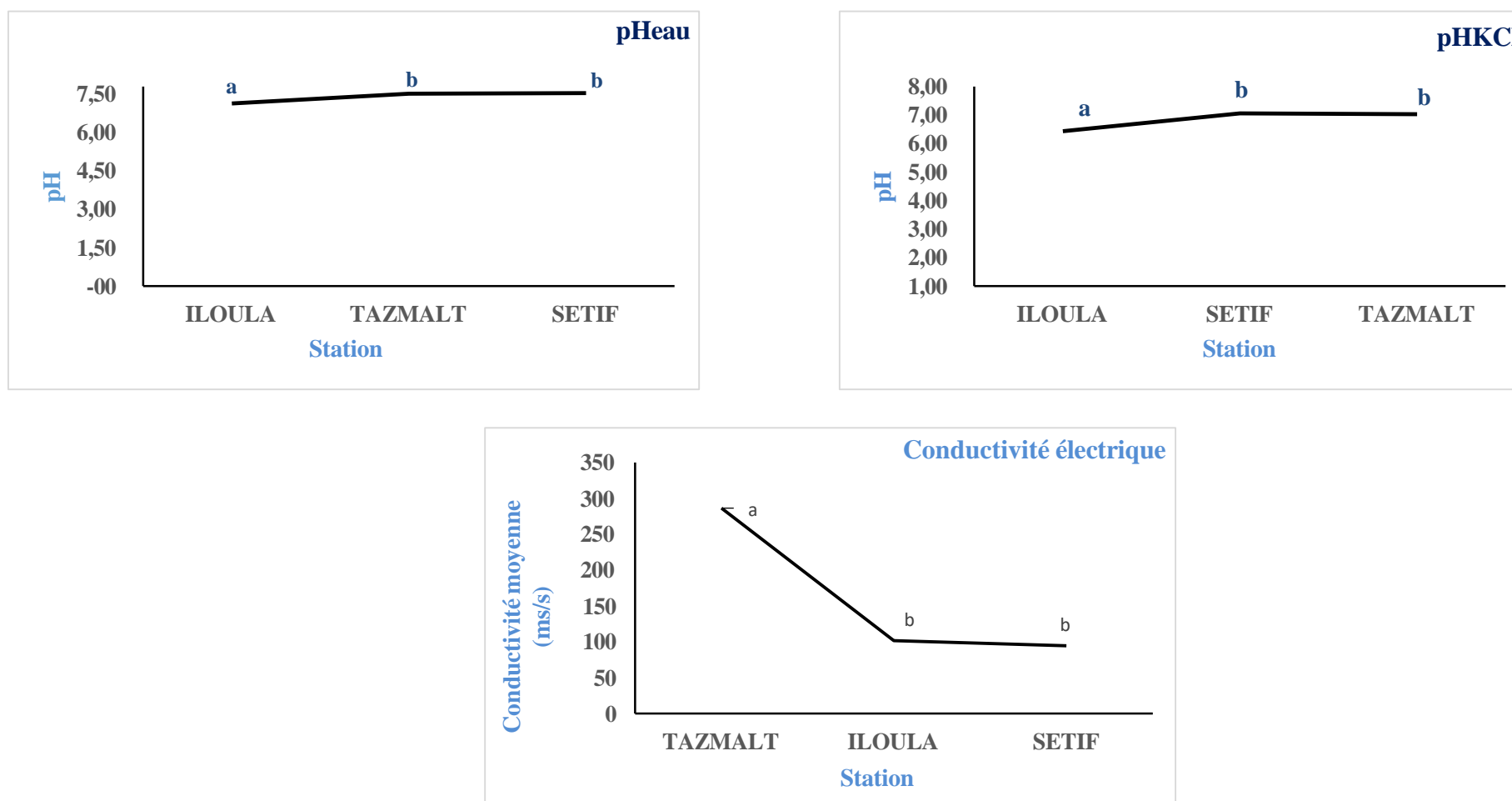


Figure 20 : Evaluation spatiale du pH_{eau} , pH_{KCl} et de la conductivité électrique des sols analysés
 (Sur les figures précédentes, les moyennes ne partageant aucune lettre sont significativement différentes ($p \leq 005$)).

L'analyse chimique des sols étudiés met en évidence l'absence totale de calcaire, confirmée par l'absence d'effervescence au contact de l'acide chlorhydrique (HCl).

Ces sols se caractérisent également par une pauvreté en azote. L'analyse de variance à un facteur a permis de distinguer un seul groupe de sols en fonction de sa teneur en cet élément fertilisant. Le test SNK n'a révélé aucune différence statistique significative ($p \leq 0.05$) en termes de pourcentage d'azote entre les sols analysés.

En ce qui concerne le carbone organique, deux groupes se distinguent en fonction des valeurs enregistrées. Les sols de Tazmalt et d'Iloula ont enregistré des taux allant de 1,60 % à 1,91 %, respectivement. Le test SNK les regroupe en un seul ensemble où aucune différence statistique significative n'a été enregistrée au seuil de $p \leq 0.05$. Quant au sol de Djebel Megres, il forme à lui seul un groupe à part dont 2,99 % du carbone ont été enregistré. Environ 57 % de ces taux est sous enfouis dans la matière organique du sol. C'est ainsi que la conversion des taux du CO enregistrés, donne des pourcentages allant de 2.51 (Tazmalt) à 5.15 (Djebel Megres). Ceci explique le rôle fondamental de la MO dans la qualité du sol et le maintien de ses fonctions essentielles. En tant que principale source de nutriments, elle constitue un véritable moteur de l'activité biologique en fournissant l'énergie nécessaire aux organismes vivants du sol. Elle favorise leur action, ce qui contribue à la formation d'un milieu bien structuré, où les pores facilitent une bonne circulation de l'air et de l'eau. Grâce à ses propriétés colloïdales, la matière organique améliore la stabilité structurale du sol ainsi que sa capacité de rétention en eau. Par ailleurs, les groupements fonctionnels présents dans les molécules organiques renforcent la capacité d'échange cationique du sol, optimisant ainsi la rétention des éléments nutritifs et même celle de certains polluants. Et elle participe à la protection du sol contre l'érosion, en améliorant sa cohésion et sa résistance aux agressions externes.

L'intensité de l'activité biologique dans le sol peut être évaluée à travers le rapport C/N. Un rapport inférieur ou égal à 10 indique une décomposition rapide de la matière organique, traduisant une bonne activité microbienne. Quand ce rapport dépasse 20, la minéralisation devienne un facteur limitant pour la libération d'azote minéral dans le sol). Les résultats enregistrés pour ce rapport pourraient expliquer les rendements en HE assez satisfaisant pour les thym poussant sur ces sols du fait de la bonne minéralisation de leur MO.

Quant au phosphore, élément clé du métabolisme énergétique des plantes, sa quantification dans les sols étudiés a été faite selon la méthode **Olsen**. Les concentrations relevées sont très faibles, variant entre 1,44 ppm et 1,70 ppm, un sol est considéré comme pauvre en phosphore assimilable lorsque sa teneur est inférieure à 150 ppm, moyennement pourvu entre 150 et 300 ppm, et riche au-delà de 300 ppm. Ainsi, les sols analysés dans cette étude appartiennent clairement à la catégorie des sols pauvres en phosphore, ce qui pourrait limiter la croissance végétale et la biosynthèse de certains métabolites secondaires tels que les HEs (**Figure 21**).

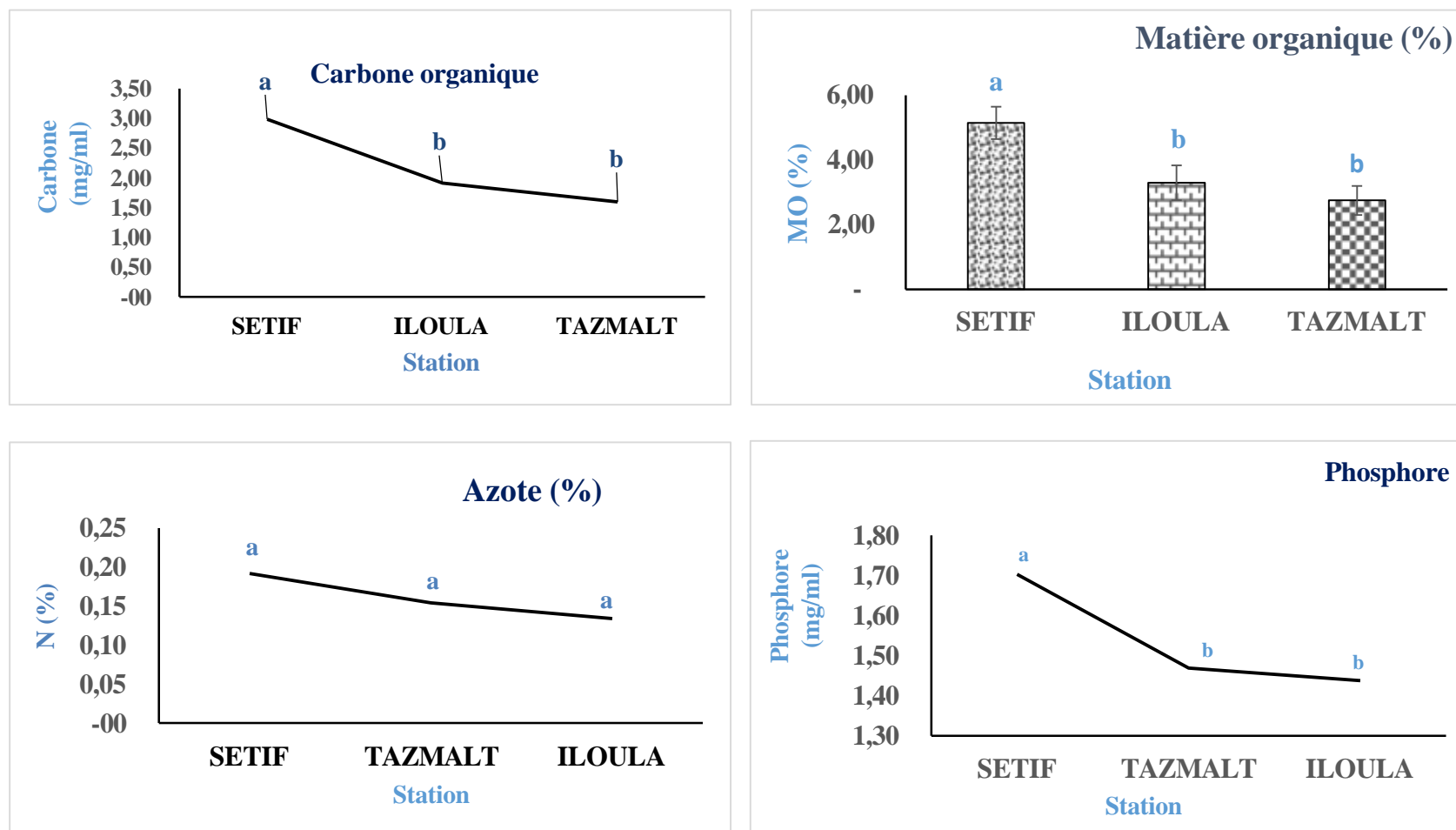


Figure 21 : Evolution spatiale des propriétés physico-chimiques des sols étudiés

(Sur les figures précédentes, les moyennes ne partageant aucune lettre sont significativement différentes ($p \leq 005$))

4. Analyse des indices climatique et bioclimatique

4.1. Climat

A partir des données climatiques fournies par TerraClimate, nous avons caractérisé le climat des stations d'étude en calculant plusieurs paramètres bioclimatiques ainsi que divers indices. Sur la période 1990-2024, les données climatiques indiquent que la moyenne annuelle des précipitations varie globalement entre 402 mm et 1359 mm. Les valeurs les plus faibles sont enregistrées à la station Megres (Sétif), tandis que les valeurs les plus élevées sont enregistrées à la station Iloula Oumalou (Tizi ouzou). Dans l'ensemble, le territoire étudié bénéficie d'un bon arrosage. Concernant les températures, les maximas varient entre 6,5°C (janvier 2005) et 35,1°C (août 1994) et qui engendre une période de sécheresse avec une durée moyenne de 3 à 4 mois, correspond généralement à la période allant de juin à septembre. Les minimas varient entre -2,3°C (janvier 2005) et 22,6 °C (juillet 2023).

4.2. Bioclimat

Les caractéristiques bioclimatiques des stations d'étude ont été déterminées à partir du calcul de l'indice ombrothermique annuel (I_o) et de l'indice de continentalité simple (I_c), selon la méthode proposée par (Pesaresi et al. 2014). Les valeurs obtenues pour les trois stations indiquent un indice de continentalité inférieur à 11 (compris entre 10,17 et 10,58) et un indice ombrothermique supérieur à 5 (allant de 5,93 à 10,73). D'après les seuils définis dans le Worldwide Bioclimatic Classification System (Rivas-Martínez et al., 2005), ces résultats classent les stations d'étude dans la zone du climat méditerranéen humide. Par ailleurs, les valeurs obtenues pour l'indice ombrothermique (I_o) s'accordent avec les critères des ombrotypes subhumides établis par (Rivas-Martínez, 2005), ce qui conforte cette classification. L'indice de continentalité exprime en degrés centigrades la différence ou oscillation entre la température moyenne du mois le plus chaud (T_{max}) et la température moyenne du mois le plus froid (T_{min}) de l'année. Cet indice permet d'évaluer l'influence continentale ou maritime sur le climat d'une région (Rivas-Martínez et al., 2011). Pour la période 1990–2024, les valeurs calculées pour les stations d'étude varient entre 10,17 °C à Megres et 10,58°C à Tazmalt, indiquant une faible variation thermique annuelle.

D'après Debrach, 1953, il est possible de distinguer quatre types De climat, selon les valeurs d' I_c :

- Climat insulaire : $M - m < 15$ °C ;

- Climat littoral : $15\text{ °C} < M - m < 25\text{ °C}$;
- Climat semi-continentale : $25\text{ °C} < M - m < 35\text{ °C}$ et,
- Climat continentale : $M - m > 35\text{ °C}$.

D'après les valeurs de l'amplitude thermique annuelle calculées ($<15\text{ °C}$), le climat des Stations d'étude est de type insulaire, selon la classification précédente.

L'évaluation de l'indice de thermicité (I_t) et de la température positive annuelle (T_p) a permis de caractériser un seul type de thermoclimat pour l'ensemble des stations étudiées. Celui-ci correspond au thermotype thermoméditerranéen, selon les seuils définis par (**Rivas-Martínez et al. 2011**). L'association entre thermotype et ombrotype permet de délimiter les ceintures bioclimatiques, conformément à la méthodologie proposée par **Pesaresi et al. 2014**. C'est ainsi que des ceintures bioclimatiques telles que le thermoméditerranéen supérieur sec supérieur, le mésoméditerranéen inférieur subhumide inférieur, ou encore le thermoméditerranéen inférieur sec inférieur, sont définies. Par ailleurs, en milieu montagneux, le topoclimat joue un rôle crucial dans la répartition des conditions climatiques locales. L'orientation du relief, notamment la distinction entre adret (versant ensoleillé) et ubac (versant ombragé), entraîne d'importantes variations de température et d'ensoleillement sur de courtes distances altitudinales, influençant ainsi la distribution de la végétation (**Pesaresi et al. 2014**).

Tableau 7 : résultats des analyses climatiques et bioclimatique

Station	T (°C)	It	Ic	Io	Iov	Pv (mm)	Tp (°C)	Tn°C	Tv (°C)	Pp (mm)
Tazmalt	14,42	448,22	10,58	64,12	0,57	40,74	25,94	4,35	71,271	924,57
Iloula	14,82	458,58	10,32	65,81	0,53	37,57	26,045	5,02	71,47	975,09
Sétif	16,42	499,12	10,17	41,78	0,48	36,20	26,925	6,35	75,25	686,11

5. Variabilité des rendements d'extraction en fonction des facteurs Environnementaux.

5.1. Effets des propriétés du sol sur la production en HE de *Thymus spp*

La corrélation entre les facteurs édaphiques et le rendement en huile essentielle a été calculée par le coefficient de corrélation de Spearman (**Tableaux 7 et 8**). Seule une corrélation négative a été trouvée entre le rendement en huile essentielle et le C/P ($\rho=0,0496$). Par conséquent, on peut en déduire que d'autres paramètres physico-chimiques

Des sols analysés pourraient affecter de manière significative le rendement en huile essentielle des populations de *Thymus* spp.

Par ailleurs, on a noté une meilleure corrélation entre les paramètres physicochimiques des sols analysés. D'une part, des corrélations positives ont été trouvées entre pH_{eau} et pH_{KCl} ($p = 0.9999$), entre les taux de certains éléments minéraux tels Ca^{2+} et Mg^{2+} ($p = 0.9978$), C et K^+ ($p = 0.9996$), P et Ca^{2+} ($p = 0.9978$). D'autres part, des corrélations négatives ont été enregistrées pour certains paramètres de la texture (sables et limons ; $p = 1$) ainsi qu'entre certains éléments minéraux et les rapports stœchiométriques (Na^{2+} et P/K), des sols analysés.

Tableau 7 : Matrice de corrélation (Pearson) : Facteurs édaphiques – Rendement en HE des Thyms étudiées

Variables	Rdt (%)	pH eau	pHKCl	Cond	N	P	K	C	MO	Na	Ca	Mg	Sable	Limon	Argile	C/N	C/P	C/K	P/K
Rdt (%)	1	-0,4477	-0,4357	0,6180	-0,8965	-0,9764	-0,9966	-0,9941	-0,9941	-0,7732	-0,9885	0,1964	0,9411	-0,9391	0,8182	-0,7666	-0,9970	-0,1057	0,7408
pH eau	-0,4477	1	0,9999	0,4263	0,7975	0,6303	0,3730	0,3479	0,3479	0,9132	0,5778	0,7888	-0,1190	0,1132	0,1477	-0,2309	0,5160	-0,8418	-0,9323
pHKCl	-0,4357	0,9999	1	0,4384	0,7893	0,6198	0,3604	0,3353	0,3353	0,9076	0,5668	0,7970	-0,1056	0,0998	0,1610	-0,2440	0,5044	-0,8490	-0,9274
Cond	0,6180	0,4263	0,4384	1	-0,2058	-0,4336	-0,6804	-0,6998	-0,6998	0,0207	-0,4920	0,8923	0,8475	-0,8506	0,9576	-0,9786	-0,5550	-0,8471	-0,0703
N	-0,8965	0,7975	0,7893	-0,2058	1	0,9710	0,8572	0,8431	0,8431	0,9741	0,9532	0,2583	-0,6939	0,6896	-0,4788	0,4028	0,9283	-0,3458	-0,9617
P	-0,9764	0,6303	0,6198	-0,4336	0,9710	1	0,9554	0,9471	0,9471	0,8919	0,9978	0,0200	-0,8458	0,8427	-0,6747	0,6099	0,9902	-0,1116	-0,8684
K	-0,9966	0,3730	0,3604	-0,6804	0,8572	0,9554	1	0,9996	0,9996	0,7187	0,9728	-0,2761	-0,9656	0,9641	-0,8626	0,8167	0,9872	0,1868	-0,6832
C	-0,9941	0,3479	0,3353	-0,6998	0,8431	0,9471	0,9996	1	1,0000	0,6997	0,9662	-0,3018	-0,9723	0,9709	-0,8758	0,8319	0,9826	0,2131	-0,6634
MO	-0,9941	0,3479	0,3353	-0,6998	0,8431	0,9471	0,9996	1,0000	1	0,6997	0,9662	-0,3018	-0,9723	0,9709	-0,8758	0,8319	0,9826	0,2131	-0,6634
Na	-0,7732	0,9132	0,9076	0,0207	0,9741	0,8919	0,7187	0,6997	0,6997	1	0,8602	0,4699	-0,5132	0,5082	-0,2681	0,1856	0,8202	-0,5489	-0,9988
Ca	-0,9885	0,5778	0,5668	-0,4920	0,9532	0,9978	0,9728	0,9662	0,9662	0,8602	1	-0,0459	-0,8791	0,8763	-0,7219	0,6607	0,9973	-0,0459	-0,8338
Mg	0,1964	0,7888	0,7970	0,8923	0,2583	0,0200	-0,2761	-0,3018	-0,3018	0,4699	-0,0459	1	0,5165	-0,5215	0,7244	-0,7802	-0,1195	-0,9958	-0,5131
Sable	0,9411	-0,1190	-0,1056	0,8475	-0,6939	-0,8458	-0,9656	-0,9723	-0,9723	-0,5132	-0,8791	0,5165	1	-1,0000	0,9644	-0,9386	-0,9119	-0,4357	0,4699
Limon	-0,9391	0,1132	0,0998	-0,8506	0,6896	0,8427	0,9641	0,9709	0,9709	0,5082	0,8763	-0,5215	-1,0000	1	-0,9660	0,9406	0,9095	0,4410	-0,4648
Argile	0,8182	0,1477	0,1610	0,9576	-0,4788	-0,6747	-0,8626	-0,8758	-0,8758	-0,2681	-0,7219	0,7244	0,9644	-0,9660	1	-0,9964	-0,7710	-0,6582	0,2199
C/N	-0,7666	-0,2309	-0,2440	-0,9786	0,4028	0,6099	0,8167	0,8319	0,8319	0,1856	0,6607	-0,7802	-0,9386	0,9406	-0,9964	1	0,7143	0,7195	-0,1366
C/P	-0,9970	0,5160	0,5044	-0,5550	0,9283	0,9902	0,9872	0,9826	0,9826	0,8202	0,9973	-0,1195	-0,9119	0,9095	-0,7710	0,7143	1	0,0280	-0,7908
C/K	-0,1057	-0,8418	-0,8490	-0,8471	-0,3458	-0,1116	0,1868	0,2131	0,2131	-0,5489	-0,0459	-0,9958	-0,4357	0,4410	-0,6582	0,7195	0,0280	1	0,5897
P/K	0,7408	-0,9323	-0,9274	-0,0703	-0,9617	-0,8684	-0,6832	-0,6634	-0,6634	-0,9988	-0,8338	-0,5131	0,4699	-0,4648	0,2199	-0,1366	-0,7908	0,5897	1

Tableau 8 : p-value

Variables	Rdt (%)	pH eau	pHKCl	Cond	N	P	K	C	MO	Na	Ca	Mg	Sable	Limon	Argile	C/N	C/P	C/K	P/K
Rdt (%)	0	0,7045	0,7130	0,5759	0,2922	0,1386	0,0522	0,0693	0,0693	0,4373	0,0966	0,8741	0,2196	0,2234	0,3899	0,4439	0,0496	0,9326	0,4689
pH eau	0,7045	0	0,0086	0,7197	0,4123	0,5659	0,7567	0,7738	0,7738	0,2672	0,6078	0,4214	0,9241	0,9278	0,9056	0,8517	0,6549	0,3629	0,2355
pHKCl	0,7130	0,0086	0	0,7111	0,4209	0,5744	0,7653	0,7823	0,7823	0,2757	0,6164	0,4128	0,9327	0,9364	0,8970	0,8431	0,6634	0,3544	0,2441
Cond	0,5759	0,7197	0,7111	0	0,8681	0,7145	0,5236	0,5066	0,5066	0,9868	0,6725	0,2982	0,3562	0,3525	0,1859	0,1320	0,6255	0,3567	0,9552
N	0,2922	0,4123	0,4209	0,8681	0	0,1536	0,3444	0,3615	0,3615	0,1451	0,1955	0,8337	0,5118	0,5155	0,6821	0,7360	0,2426	0,7752	0,1767
P	0,1386	0,5659	0,5744	0,7145	0,1536	0	0,1908	0,2079	0,2079	0,2987	0,0419	0,9873	0,3582	0,3619	0,5285	0,5825	0,0890	0,9288	0,3303
K	0,0522	0,7567	0,7653	0,5236	0,3444	0,1908	0	0,0171	0,0171	0,4895	0,1489	0,8219	0,1674	0,1711	0,3377	0,3916	0,1018	0,8804	0,5211
C	0,0693	0,7738	0,7823	0,5066	0,3615	0,2079	0,0171	0	<0,0001	0,5066	0,1660	0,8048	0,1503	0,1540	0,3206	0,3746	0,1189	0,8633	0,5382
MO	0,0693	0,7738	0,7823	0,5066	0,3615	0,2079	0,0171	<0,0001	0	0,5066	0,1660	0,8048	0,1503	0,1540	0,3206	0,3746	0,1189	0,8633	0,5382
Na	0,4373	0,2672	0,2757	0,9868	0,1451	0,2987	0,4895	0,5066	0,5066	0	0,3406	0,6886	0,6569	0,6606	0,8272	0,8812	0,3877	0,6301	0,0316
Ca	0,0966	0,6078	0,6164	0,6725	0,1955	0,0419	0,1489	0,1660	0,1660	0,3406	0	0,9708	0,3163	0,3200	0,4866	0,5405	0,0471	0,9707	0,3723
Mg	0,8741	0,4214	0,4128	0,2982	0,8337	0,9873	0,8219	0,8048	0,8048	0,6886	0,9708	0	0,6545	0,6508	0,4842	0,4303	0,9237	0,0585	0,6570
Sable	0,2196	0,9241	0,9327	0,3562	0,5118	0,3582	0,1674	0,1503	0,1503	0,6569	0,3163	0,6545	0	0,0037	0,1703	0,2242	0,2692	0,7130	0,6885
Limon	0,2234	0,9278	0,9364	0,3525	0,5155	0,3619	0,1711	0,1540	0,1540	0,6606	0,3200	0,6508	0,0037	0	0,1666	0,2205	0,2729	0,7092	0,6923
Argile	0,3899	0,9056	0,8970	0,1859	0,6821	0,5285	0,3377	0,3206	0,3206	0,8272	0,4866	0,4842	0,1703	0,1666	0	0,0539	0,4395	0,5427	0,8588
C/N	0,4439	0,8517	0,8431	0,1320	0,7360	0,5825	0,3916	0,3746	0,3746	0,8812	0,5405	0,4303	0,2242	0,2205	0,0539	0	0,4935	0,4887	0,9128
C/P	0,0496	0,6549	0,6634	0,6255	0,2426	0,0890	0,0171	0,1189	0,1189	0,3877	0,0471	0,9237	0,2692	0,2729	0,4395	0,4935	0	0,9822	0,4193
C/K	0,9326	0,3629	0,3544	0,3567	0,7752	0,9288	0,8804	0,8633	0,8633	0,6301	0,9707	0,0585	0,7130	0,7092	0,5427	0,4887	0,9822	0	0,5985
P/K	0,4689	0,2355	0,2441	0,9552	0,1767	0,3303	0,5211	0,5382	0,5382	0,0316	0,3723	0,6570	0,6885	0,6923	0,8588	0,9128	0,4193	0,5985	0

5.2. Effets du climat et du bioclimat sur la production en HEs de *Thymus* spp

A l'inverse des paramètres édaphiques, le test de colinéarité (**Tableaux 9 et 10**) a mis en évidence plus de corrélations (négative) entre certains indices climatiques (définissant le bioclimat) et le rendement en huile essentielle des morphotypes du thym investigué. A cet effet, les paramètres T, T_p et T_v sont négativement proportionnels aux rendements en HE des morphotypes des thym étudiés, avec des p-values allant de 0.0105 à 0.0493.

Il est à noter aussi qu'une colinéarité positive a été trouvée entre certains paramètres du climat, notamment les températures (Température moyenne annuelle, Température positive annuelle, Température d'été), les précipitations (Précipitations d'été) et les indices calculés (indices de thermicité, indice de continentalité. Les p-values de ces corrélations sont de l'ordre de 0.0033 entre T et It, de 0.0323 entre Pv et Ic et de 0.0320 entre Tp et Tv.

Tableau 9 : Matrice de corrélation (Pearson) : Paramètres climatiques – indices de bioclimat / Rendement en HE des Thyms étudiées

Variables	Rdt (%)	T°C	lt	lc	lo	lov	Pv (mm)	Tp°C	Tn°C	Tv°C	Pp(mm)
Rdt (%)	1	-0,9970	-0,9966	0,8324	0,9850	0,9125	0,8033	-0,9999	-0,9743	-0,9978	0,9625
T°C	-0,9970	1	1,0000	-0,8728	-0,9686	-0,9414	-0,8469	0,9956	0,9888	0,9896	-0,9386
lt	-0,9966	1,0000	1	-0,8753	-0,9674	-0,9431	-0,8496	0,9951	0,9896	0,9889	-0,9368
lc	0,8324	-0,8728	-0,8753	1	0,7241	0,9863	0,9987	-0,8232	-0,9358	-0,7936	0,6508
lo	0,9850	-0,9686	-0,9674	0,7241	1	0,8281	0,6883	-0,9877	-0,9208	-0,9943	0,9949
lov	0,9125	-0,9414	-0,9431	0,9863	0,8281	1	0,9766	-0,9056	-0,9812	-0,8832	0,7672
Pv (mm)	0,8033	-0,8469	-0,8496	0,9987	0,6883	0,9766	1	-0,7933	-0,9167	-0,7617	0,6115
Tp°C	-0,9999	0,9956	0,9951	-0,8232	-0,9877	-0,9056	-0,7933	1	0,9705	0,9987	-0,9668
Tn°C	-0,9743	0,9888	0,9896	-0,9358	-0,9208	-0,9812	-0,9167	0,9705	1	0,9571	-0,8767
Tv°C	-0,9978	0,9896	0,9889	-0,7936	-0,9943	-0,8832	-0,7617	0,9987	0,9571	1	-0,9784
Pp(mm)	0,9625	-0,9386	-0,9368	0,6508	0,9949	0,7672	0,6115	-0,9668	-0,8767	-0,9784	1

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0,05$

Tableau 10 : p-value

Variables	Rdt (%)	T°C	lt	lc	lo	lov	Pv (mm)	Tp°C	Tn°C	Tv°C	Pp(mm)
Rdt (%)	0	0,0493	0,0525	0,3739	0,1106	0,2683	0,4062	0,0105	0,1445	0,0425	0,1750
T°C	0,0493	0	0,0033	0,3247	0,1598	0,2190	0,3569	0,0598	0,0953	0,0918	0,2242
lt	0,0525	0,0033	0	0,3214	0,1631	0,2157	0,3536	0,0630	0,0920	0,0951	0,2275
lc	0,3739	0,3247	0,3214	0	0,4845	0,1057	0,0323	0,3844	0,2294	0,4165	0,5489
lo	0,1106	0,1598	0,1631	0,4845	0	0,3788	0,5167	0,1001	0,2551	0,0680	0,0644
lov	0,2683	0,2190	0,2157	0,1057	0,3788	0	0,1379	0,2788	0,1237	0,3108	0,4433
Pv (mm)	0,4062	0,3569	0,3536	0,0323	0,5167	0,1379	0	0,4167	0,2616	0,4487	0,5812
Tp°C	0,0105	0,0598	0,0630	0,3844	0,1001	0,2788	0,4167	0	0,1550	0,0320	0,1645
Tn°C	0,1445	0,0953	0,0920	0,2294	0,2551	0,1237	0,2616	0,1550	0	0,1871	0,3195
Tv°C	0,0425	0,0918	0,0951	0,4165	0,0680	0,3108	0,4487	0,0320	0,1871	0	0,1325
Pp(mm)	0,1750	0,2242	0,2275	0,5489	0,0644	0,4433	0,5812	0,1645	0,3195	0,1325	0

5.3. Effets combinés des facteurs de l'environnement sur la variabilité des HEs de *Thymus spp*

Les variations rencontrées dans la production quantitative et qualitative des huiles essentielles des trois morphotypes des thyms étudiés, peuvent être dues à plusieurs facteurs tels que les paramètres écologiques, les techniques d'extraction, l'organe végétale et le patrimoine génétique de l'espèce végétale (Senatore, 1996 ; Kokkini et al., 1997 ; Russo et al., 1998 ; Karousou et al., 2005).

Afin d'évaluer l'effet des facteurs environnementaux sur la variabilité physicochimique de l'HE des morphotypes étudiés, une ACP portant une matrice des pourcentages des principaux composants, les provenances et leurs indices bioclimatiques, a été réalisée.

6. Valeurs propres des variables

L'ACP, réalisée sur la base des coefficients de corrélation de Spearman entre les facteurs environnementaux (sol et climat) a montré que les deux premiers axes factoriels représentaient 100 % de la variation totale, ce qui explique la contribution de chaque variable. D'après les résultats (Tableau 11), on constate que le premier axe recèle 71,97 % de la variabilité totale suivi par 28,03 % pour le deuxième axe. Le premier axe représente une bonne description de la dispersion des individus, car il présente la majorité de la variance totale. Cette différenciation des valeurs entre les axes explique qu'il y a une bonne séparation entre ces derniers.

Tableau 11 : les valeurs propres des variables

Axes	F1	F2
Paramètres		
Valeur propre	23,7499	9,2501
Variabilité (%)	71,9693	28,0307
% cumulé	71,9693	100,0000

6.1. Cercle des corrélations

L'analyse révèle que toutes les variables sont pertinentes et participent à l'explication de la variance. Elle permet également d'observer la corrélation entre les variables et les axes (Figure 22).

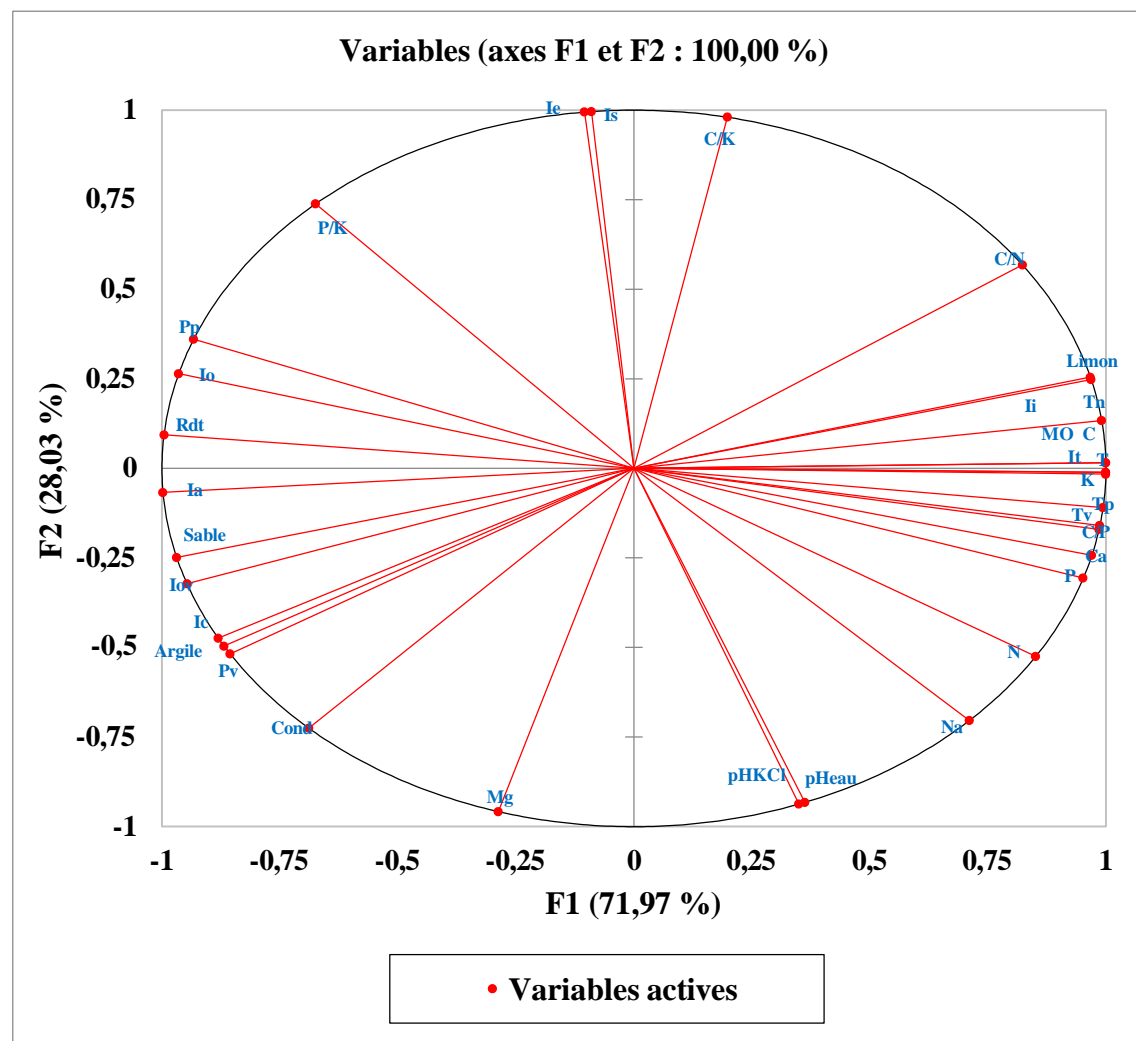


Figure 22 : Cercle de corrélation de l'ACP

L'axe 1 est dominé par les paramètres climatiques (T , T_p , T_n , T_v , P_v et P_p) dont les contributions oscillent entre 3,66 % et 4,20 %, suivis de certains indices de bioclimat (I_i , I_c , I_o , I_{ov}) avec des contributions allant de 3,26 % (pour I_i) à 4,21 % (pour I_c). De plus, le potassium (K^+) marque une contribution à cet axe de 4,21 %, de la variabilité totale (**Annexe III**).

L'axe 2, quant à lui, est lié à certaines propriétés physicochimiques des HEs telles que les indices de saponification et d'ester, dont les contributions les plus importantes sont 10,7232 (I_e) et 10,6921 (I_s) (**Annexe III**).

Les morphotypes de Thym étudiés se répartissent en trois groupes en fonction du plan de projection des axes 1 et 2 (**Figures 23 et 24**).

- Le premier groupe et le deuxième groupe se distinguent sur l'axe 1, opposant les paramètres physicochimiques du sol tels que les limons, la MO, le C_{org} , le C/N, le Ca, le P et à un degré moins l'azote et le sodium, les paramètres liés aux variables climatiques (T , I_t , T_p , T_v ...) d'une part et aux rendements en HE, leur indice d'acide (I_a), le pourcentage des sables et d'argiles ainsi que d'autres paramètres du bioclimat, d'autre part. Cet ensemble est représenté par les morphotypes des stations de Tazmalt (Bejaia) et de Djebel Megres (Sétif).

- Le troisième groupe est principalement caractérisé par les paramètres physicochimiques du sol (pH_{eau} , pH_{KCl} , Mg, C/K et à un degré moindre le P/K et la conductivité électrique), et les paramètres de la qualité chimique des huiles extraites, à savoir l'indice d'ester et de saponification. Ce groupe constitue la population d'Iloula (Tizi-Ouzou).

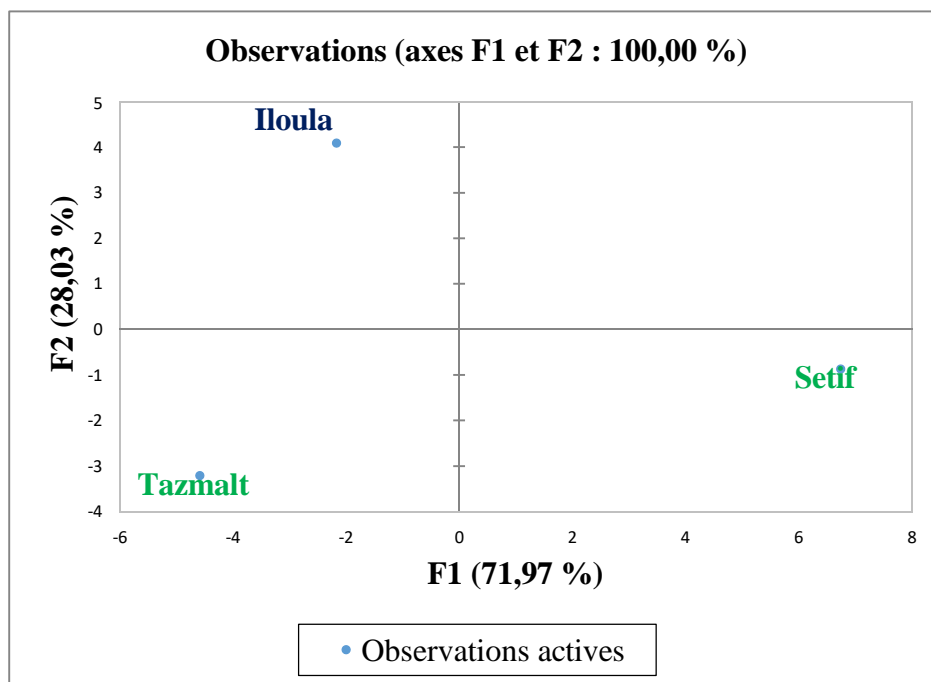


Figure 23 : Contribution des observations

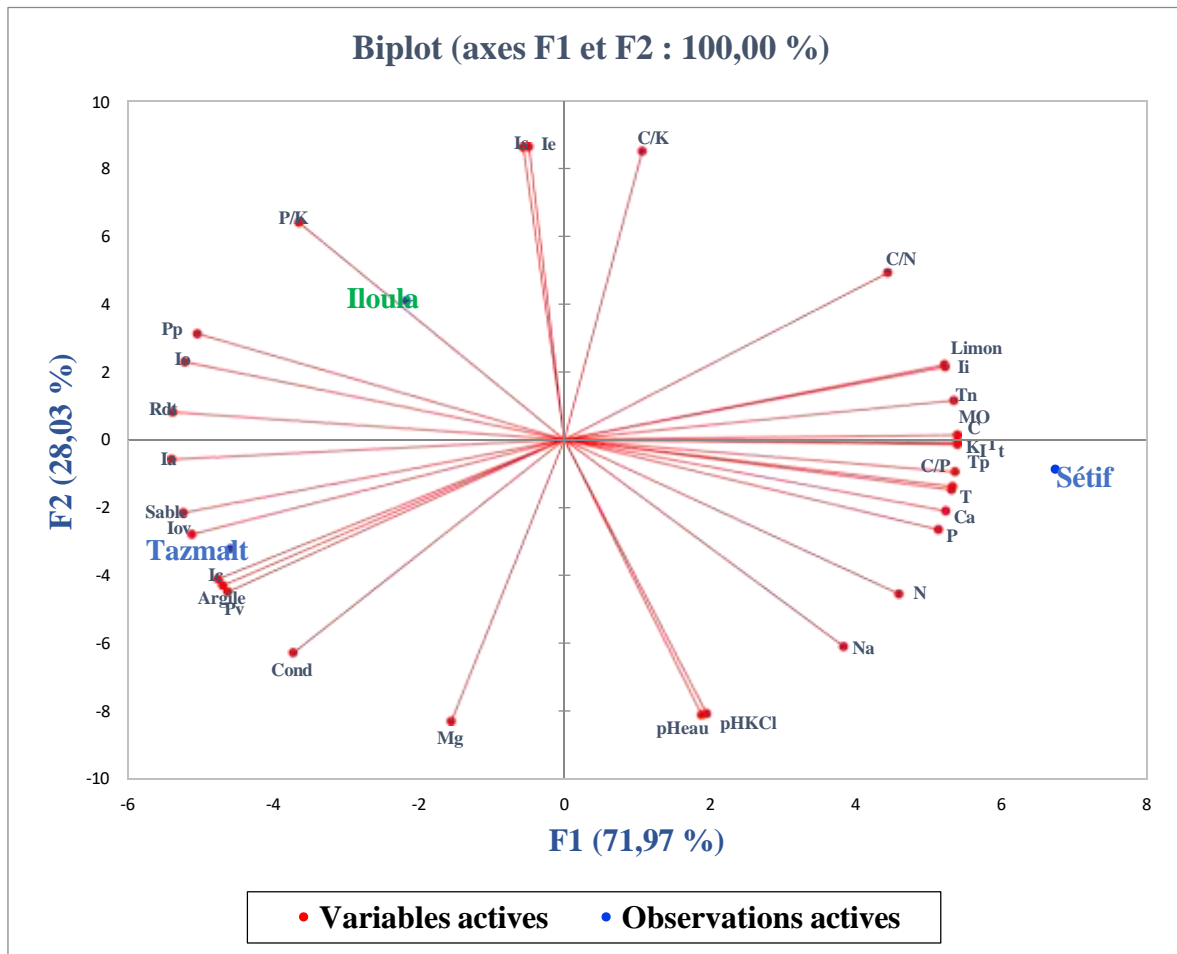


Figure 24 : Biplot de l'ACP

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Ce travail de recherche s'est inscrit dans une démarche d'analyse écologique et chimique visant à mieux comprendre les relations complexes entre l'environnement naturel et la production des métabolites secondaires chez une espèce du genre *Thymus*, appartenant à la famille des Lamiacées. Plus précisément, nous avons étudié l'influence de certains facteurs environnementaux – notamment climatiques, édaphiques et géographiques – sur la variabilité qualitative et quantitative des huiles essentielles issues de trois morphotypes prélevés dans trois régions distinctes d'Algérie : Iloula (Tizi-Ouzou), Tazmalt (Bejaia) et Djebel Megres (Sétif).

L'analyse physico-chimique des huiles essentielles, extraites par hydrodistillation, a révélé des variations significatives (analyses statistiques) de rendement entre les stations, reflétant l'influence des conditions pédoclimatiques sur le métabolisme secondaire de la plante. Bien que leurs caractéristiques organoleptiques (couleur, odeur) présentent une homogénéité apparente, les dosages physicochimiques effectués au laboratoire ont mis en évidence des différences marquées (analyses statistiques) dans plusieurs paramètres : densité, indice de réfraction, pouvoir rotatoire, ainsi que les indices d'acide, d'ester, de peroxyde et d'iode. Ces écarts témoignent d'une hétérogénéité chimique significative entre les huiles étudiées.

Les données pédoclimatiques collectées et analysées pour les sites d'étude (pH, salinité, texture du sol, matières organiques, éléments minéraux, précipitations, températures, indices climatiques) ont été soumises à des traitements statistiques divers (analyse de variance, corrélations, ACP). Ces analyses ont permis de montrer que certains facteurs environnementaux, notamment les paramètres du climat (T, Tp, Tn, Tv, Pv et Pp) et certains indices du bioclimat (It, Ic Io Iov) influencent directement la biosynthèse et le rendement des composés volatils extraits des thymus étudiés. De même, et dans une moindre mesure, les traitements statistiques réalisés ont montré l'impact de certains paramètres édaphiques sur la qualité des HEs examinées.

Par ailleurs, la présence de races biogéochimiques (chénotypes au sens de la composition chimique des HEs) distinctes entre les morphotypes analysés souligne l'influence conjointe des facteurs génétiques et environnementaux sur la production des huiles essentielles. Cela confirme que les espèces du genre *Thymus* présentent une plasticité chimique remarquable, qui peut être exploitée à des fins de sélection variétale ou d'optimisation de cultures pour une production ciblée d'huiles à intérêt thérapeutique ou

Industriel.

Notre étude confirme que la qualité et la quantité des huiles essentielles dépendent non seulement de la génétique de la plante, mais aussi, et principalement, des conditions écologiques où évolue source. Ce constat permet d'envisager une valorisation optimisée des plantes aromatiques locales, en adaptant leur culture pour restaurer les écosystèmes dégradés (naturellement ou par l'homme).

Au-delà de son aspect scientifique, cette étude promeut une exploitation durable de la flore algérienne en associant écologie, chimie et statistiques. Elle ouvre des perspectives économiques dans les secteurs des huiles essentielles (santé naturelle, cosmétique bio et agriculture durable).

En perspective, il serait pertinent d'approfondir cette étude en incluant d'autres espèces de genre *Thymus* et en intégrant des analyses chromatographiques fines (GC/MS), afin d'établir leur profil chimique, découvrir de nouveaux chémotype et valoriser leur potentiel biologique en vue de développer des applications innovantes à haute valeur ajoutée.

Références bibliographiques

- Abatzoglou J. T., Dobrowski S. Z., Parks S. A., Hegewisch K. C. (2018).** TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific data*, 5 (1), 1-12.
- Adams R. P. (2007).** Identification of Essential Oil Components by Gas Chromatography/Mass Spectrometry (4th ed.). Allured Publishing Corporation, 698p.
- Aomari L., Sehaki C. (2018).** Optimisation de l'extraction de l'huile essentielle de *Thym*. Caractérisation et évaluation de l'activité antimicrobienne. Mémoire de master. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 86 p.
- Aubert G. (1978).** Methodes d'analyses des sols : *Documents de travail tous droits reserves*. Centre régional de documentation pédagogique, CP/Dp. Marseille. 191p.
- Autumn essential oils of Greek oregano. *Phytochemistry*, 44(5), 883-886.
- Aziz Z. A. A., Ahmad A., Setapar S. H. M., Karakucuk A., Azim M. M., Lokhat sD., Ashraf G. M. (2020).** Essential oils: extraction techniques, pharmaceutical and therapeutic potential - a review. *Current Drug Metabolism*, 20 (7), 1-17.
- Baars B. J., Geld N., Kozma R. (2021).** Global workspace theory (GWT) and prefrontal cortex: Recent developments. *Frontiers in psychology*, 12, 749868.
- Belleau F. (1990).** Analyse de l'huile essentielle du *Ledum groenlandicum* Retzius. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi. Université du Québec à Chicoutimi. P19
- Benbouali M. (2006).** Valorisation des extraits de plantes aromatiques et médicinales de: «*Mentha rotundifolia* et *Thymus vulgaris*» (Doctoral dissertation, ACHOUR Djillali)133 p.
- Berger R. G. (2007).** *Flavours and fragrances: chemistry, bioprocessing and sustainability*. Springer Science & Business Media 611 p.
- Bohren C., Buchbauer. G. (2005).** Les huiles essentielles dans les mécanismes de défense des plantes. *Journal of Essential Oil Research*, 17 (6): 567 à 573.
- Boukhatem M. N., Kameli A., Saidi F., Boucherit-Otmani Z. (2013).** Quality assessment of essential oils: Criteria and standards used in pharmacopoeias and other scientific references. *International Journal of Pharmacognosy and Phytochemical Research*, 5(4), 195-202.
- Bounatirou S., Smiti S., Miguel M. G., Faleiro M. L., Rejeb M. N., Neffati M., Pedro L.**
- Bourgaud, F., Gravot, A., Milesi, S., Gontier, E. (2001).** Plantes médicinales et aromatiques : sources de molécules bioactives. *Phytothérapie*, 1(2), 63–72.
- Bousbia, N. (2011).** *Extraction des huiles essentielles riches en anti-oxydants à partir de produits naturels et de co-produits agroalimentaires*. Thèse en co-tutelle (Doctoral dissertation, Université d'Avignon, France). Spécialité Chimie. 128 p.
- Boutekedjiret C., Bentahar F., Belabb R., Bessiere J.M. (2003).** Extraction o rosemary essential oil by steam distillation and hydrodistillation. *Flavour and Fragrance Journal*, 18(6), 481-484.
- Bowles E. J. (2020).** *Chemistry of aromatherapeutic oils*. Routledge.
- Brady, N. C., Weil, R. R. (2010).** Elements of the nature and properties of soils. 3rd edn, 4, 10.

Bruneton J. (2009). Pharmacognosie, phytochimie, plantes médicinales (4e éd.). Lavoisier 1269 p.

Burt S. (2004). Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods-a review. *International Journal of Food Microbiology*, 94 (3), 223-253.

Chou C. H. (1999). Roles of allelopathy in plant biodiversity and sustainable agriculture. *Critical reviews in plant sciences*, 18 (5), 609-636

Clevenger J. F. (1928). Apparatus for volatile oil determination, description of new type. *American Perfumer & Essential Oil Review*, 17 (4), 345-349.

Codex Alimentarius. (2019). Codex Standard for Named Vegetable Oils (CODEX-STAN 210-1999). FAO/WHO Food Standards Programme.

Copolovici L., Kännaste A., Pazouki L., Niinemets Ü. (2012). Emissions of green leaf volatiles and terpenoids from *Solanum lycopersicum* are quantitatively related to the severity of cold and heat shock treatments, *J. Plant Physiol*, 169 (7), 664–672
Corymbia citriodora : qualité, efficacité et toxicité. 117 p.

Debrach J. 1953. Notes sur les climats du Maroc occidental. *Maroc méridional* 32 : 1122-1134.

Dhifi W., Bellili S., Jazi S., Bahloul N., Mnif W. (2016). Essential Oils' Chemical Characterization and Investigation of Some Biological Activities: A Critical Review. *Medicines (Basel, Switzerland)*, 3 (4), 25

Djerrad Z., Kadik L., Djouahri A.(2015).Chemical variability and antioxidant activities among *Pinus halepensis* Mill. essential oils provenances, depending on geographic variation and environmental conditions .*Industrial Crops and Products* 74, 440-449.

Duchaufour PH. (2001). Introduction à la science du sol. 6ème édition de l'abrégé de

El Asbahani A., Miladi K., Badri W., Sala M., Addi EA., Casabianca H .(2015) Essential oils : from extraction to encapsulation . *Int J Pharm* 483 (1-2) :220-243

Ferhat MA., Meklati BY., Chemat F. (2007) Comparison of different isolation methods of essential oil from citrus fruits: Cold pressing, hydrodistillation and micro wave 'dry' distillation. *Flavour and Fragrance Journal*, 2007; 22 (6): 494-504.

Franchomme, P., Jollois, R., & Pénéol, D. (2001). L'aromathérapie exactement: encyclopédie de l'utilisation thérapeutique des extraits aromatiques. *Paris, France: Roger Jollois.*

G. (2007). Chemical composition, antioxidant and antibacterial activities of the essential oils isolated from Tunisian *Thymus capitatus* Hoff. et Link. *Food Chemistry*, 105(1), 146-155.

Gachathi, M. J., Kiprono, P. C., Ombito, J. O., Mwangi, B. N., Maina, E. W. (2019). Environmental factors influencing the composition of essential oils in aromatic plants. *Journal of essential oil research*, 31(4), 387–397.

Garnero J. (1985). Semi preparative separation of terpenoids from essential oil. *Phototherapy* 15, 19 .

Gavahian, M., Chu, Y. H. (2018). Ohmic accelerated steam distillation of essential oil from lavender in comparison with conventional steam distillation. *Innovative food science & emerging technologies*, 50, 34-41.

Gharby S., Harhar H., Guillaume D., Haddad A., Charrouf Z .(2012).The origin of virgin argan oil's high oxidative stability unraveled. *Natural Product Communications* 7 (5).

Gharzouli R., Gharzouli K., Khennouf S. (2020). Influence des paramètres de séchage sur le rendement en huiles essentielles de plantes médicinales de l'Est algérien. *Revue des Bioressources*, 10(1), 34-42.

Grote R., Monson R. K., & Niinemets Ü. (2013). Leaf-level models of constitutive and stress-driven volatile organic compound emissions. In *Biology, controls and models of tree volatile organic compound emissions* (pp. 315-355).

Guan H-H, Alikhajeh J, Khajeh K, Ranjbar B, Naderi-Manesh H, Lin Y-H, Liu E, Hsieh Y-C, Chuankhayan P, Huang Y-C, Jeyaraman J, Liu M-Y, Chen C-J (2010). Structure of *Bacillus amyloliquefaciens* α -amylase at high resolution: implications for thermal stability. *Structural Biology and Crystallization Communications*, 66 (2), 121-129.

Guenther E. (1948). The essential oils, vol. 1. *I: History—origin in plants—production—analysis* (ed. Guenther, E.), 377-379.

Guignard J. L. 2000. Biochimie végétale. 2ème édition. Edition Dunod, Paris, pp 198-207.

Hanif, M.A., Nisar, S., Samin Khan, G., Mushtaq, Z., & Zubair, M. (2019). Essential oils, In: *Essential oil research: Trends in biosynthesis, analytics, industrial applications and biotechnological production*, p 3-17.

Harrison S.P., Morfopoulos C., Dani K., Prentice I.C., Arneth A., Atwell B.J., Barkley M.P., Leishman M.R., Loreto F., Medlyn B.E., (2013). Volatile isoprenoid emissions from plastid to planet. *New Phytol* .197 (1), 49–57.

Hassani K., Haley M. (2019). Unsupervised multi-task feature learning on point clouds. *Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision*, 8160-8171.

Hudaib, M., Speroni, E., Di Pietra, A. M., Cavrini, V. (2002). GC/MS evaluation of thyme (*Thymus vulgaris* L.) oil composition and variations during the vegetative cycle. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 29(4), 691–700.

Hussain A. I. (2009). Characterization and biological activities of essential oils of some species of Lamiaceae. *Faisalabad: University of Agriculture* 142–149.

Joret G., Hébert J. (1955). Le carbone organique des sols de France. *Annales Agronomiques*, 6(4), 541-552.

Jouyban A., Fakhree M. A. A., Ghafourian T. (2005). Review of pharmaceutical applications of hydrodistillation process and parameters affecting essential oil yield. *Journal of Essential Oil Research*, 17(2), 123-128.

Kaloustian J., Hadji-Minaglou F. (2012). La connaissance des huiles essentielles :qualitologie et aromathérapie ; Entre science et tradition pour une application médicale paraisonnée. Springer, 206 p.

Karousou, R., Koureas, D. N., & Kokkini, S. (2005). Essential oil composition is related to the natural habitats : *Coridothymus capitatus* and *Satureja thymbra* in NATURA 2000 sites of Crete. *Phytochemistry*, 66(22), 2668-2673.

Keefover-Ring K., Thompson JD., Linhart YB. (2009). Au-delà de six parfums : définition d'un septième chémotype de *Thymus vulgaris* nouveau dans le sud de la France par extraction à l'éthanol. *Flavour and Fragrance Journal*, 24 (3). 117–122.

Kokkini, S., Karousou, R., Dardioti, A., Krigas, N., & Lanaras, T. (1997).
Körner C. (2007). The use of 'altitude' in ecological research. *Trends in Ecology & Evolution*, 22(11), 569–574.

Kouidri M., Belhamiti B T., Ait Amrane A.(2020). Chemical composition, in-vitro antibacterial and antioxidant activities of *Syzygium aromaticum* essential oil. *Journal of Food Measurement and Characterization* 14 (4), 2352-2358.

Koziol N. (2015). Huiles essentielles d'*Eucalyptus globulus*, d'*Eucalyptus radiata* et de

Kumar, S., Shukla, S. D., Gautam, P. K., Kato, S., & Kojima, T. (2011). Effect of climate and soil condition on oil content of *Jatropha* plants grown in Arid Areas of India. *Journal of Arid Land Studies*, 21 (2), 51-55.

Lawless J. (1996). The encyclopedia of essential oils. Element. 226 p.

Liber Z., Carović-Stanko K., Politeo O., Strikić F., Kolak I., Milos M., Šatović

Lis-Balchin M. (2006). Aromatherapy science: a guide for healthcare professionals. Pharmaceutical press. 462 p.

Lo Presti M., Ragusa S., Trozzi A., Dugo P., Visinoni F., Fazio A., Mondello L. (2005). A comparison between different techniques for the isolation of rosemary essential oil. *Journal of separation science*, 28(3), 273-280.

Mann, J., Davidson, R. S., Hobbs, J. B., Banthorpe, D. V., & Harborne, J. B. Masango

Masango P. (2005). Cleaner production of essential oils by steam distillation, *Journal of Cleaner production* 13 (8), 833-839.

Mességué M. (1979). *Health secrets of plants and herbs*. HarperCollins.

Moja. S et Jullien. F (2014), Les menthes, diversité des espèces et composition chimique in *Jardins de France* n°630 Simples et aromatiques : le bien être à cultive vol. 419, no 1, p. 64-77.

Morales R. (2002). Biogéographie et diversité des Lamiacées. Dans JR Press (éd.), Flore de la Méditerranée. Oxford University Press. pp. 1-10.

Niinemets Ü., Arneth A., Kuhn U., Monson R., Peñuelas J., Staudt M. (2010). The emission factor of volatile isoprenoids: stress, acclimation, and developmental responses, *Biogeosciences*, 2010a, 7 (7), 2203–2223.

Niinemets Ü., Monson R., Arneth A., Ciccioli P., Kesselmeier J., Kuhn U., Noe S., Penuelas J., Staudt M.(2010). The leaf-level emission factor of volatile isoprenoids: caveats, model algorithms, response shapes and scaling. *Biogeosciences*, 7 (6), 1809–1832

Okoh O., Alexander P S., Anthony J A., (2010). Comparative evaluation of the antibacterial activities of the essential oils of *Rosmarinus officinalis* L. obtained by hydrodistillation and solvent free microwave extraction ... (308-312).

Ouédraogo RF., Sama H., Nana R., Kihindo AP., Kiendrébéogo FK., Badiel B., Kaboré Z., Dondassé E., Ouédraogo M., Zombré G.(2020). Impact of pedo-climatic conditions on *Jatropha curcas* L, seeds oil content, *Int J Sci Res*; 10:1230–1.

P. (2005). Cleaner production of essential oils by steam distillation. *Journal of Cleaner production*, 13(8), 833-839.

Palmer J. M. (1965). Soils and the soil associations of Republic of the Sudan.

Patel RP, Singh R., Rao BRR, Singh RR., Srivastava A., Lal, RK. (2016). Réponse différentielle du génotype × environnement sur la phénologie, le rendement en huile essentielle et la qualité des arômes naturels de cinq espèces d'*Ocimum*. *Cultures et produits industriels*, 87. 210–217.

Pesaresi S., Biondi E., Casavecchia S. (2014). Bioclimate map of Italy. *Plant Biosystems*, 148 (6), 1205–1233.

Pirbalouti A G., Mahdad E., Craker L. (2013). Effects of drying methods on qualitative and quantitative properties of essential oil of two basil landraces. 2440-2449.

Quézel P., Santa S. (1962). Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales, Tome I. Paris : Éditions du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) *Revue d'Écologie (La Terre et La Vie)* 16 (4), 459-459 .

Raal A., Orav A., Püssa T., Valner C., Malmiste B., Arak E.(2012).Content of essential oil, terpenoids and polyphenols in commercial chamomile (*Chamomilla recutita* L. Rauschert) teas from different countries. *Food Chemistry* 131 (2), 632-638

Raaman, N. (2006). Techniques phytochimiques (p. 75).

Regnault-Roger C., Vincent C., Arnason JT .(2012). Les huiles essentielles dans la lutte contre les insectes : des produits à faible risque dans un monde à enjeux élevés. *Revue annuelle d'entomologie*, 57. 405–424.

Reza M., Afshar L.,Yazdani SH.(2017). *Jornal of medical education* 16 (4),198-207.

Riaz, U., Hassan, A., Fatima, M., Aziz, H., Rasool, M., Murtaza, G. (2023). Plant Secondary Metabolites and Environmental Stress: Overview and Implications. 1–20.

Rivas-Martínez S. (2005). Global Bioclimatics (Clasificación Bioclimática de la Tierra Worldwide Bioclimatic Classification System.

Rivas-Martínez S., Sánchez-Mata D., Costa M. (2011). Bioclimatology of the Iberian Peninsula. *International Journal of Environmental Studies*, 68(1), 45–64.

Russo, M., Galletti, G. C., Bocchini, P., & Carnacini, A. (1998). Essential Oil Chemical Composition of Wild Populations of Italian Oregano Spice (*Origanum vulgare* spp. *Hirtum* (Link) Ietswaart) : A Preliminary Evaluation of Their Use in Chemotaxonomy by Cluster Analysis. 1. Inflorescences. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46(9), 3741-3746.

Sadeghi N., Shaterian M., Craker LE (2015). Variabilité chimique et concept de chémotype des huiles essentielles de *Zataria multiflora* Boiss. Populations liées à des facteurs géographiques, climatiques et édaphiques. *Molécules*, 20(11), 20194–20208.

Safi, F. (2024).Traditional Medicine with Cade Oil in Pediatric Emergency Care Tunisian *Journal of Emergency Medicine* 2 (4).

- Salehi-Arjmand H., Hadian J., Khadivi-Khub A. (2014).** Comparative analysis of essential oil compositions in seven populations of Bakhtiarian savory in natural and field conditions. *Acta Physiologiae Plantarum*, 36, 1107–1114.
- Salvador M. D., Aranda F., F., regapane G. (2001).** Influence of fruit ripening on ornicabra virgin olive oil quality: A study of four successive crop seasons. *Food Chemistry*, 73(1), 45-53.
- Santos, G .,Guerrero, C ., Reis, M., Miguel, G ., Kienle , U. (2000).** Proceedings of the 19e Journées Internationales Huiles Essentielles et Extraits 30, 553-560.
- Sehgal A., Sita K., Siddique K.H.M., Kumar R., Bhogireddy S., Varshney RK., HanumanthaRao B., Nair RM., Rasad P.V.V., Nayyar H. (2018).**rought or/and heat-stress effects on seed filling in food crops: impacts on functional biochemistry, seed yields, and nutritional quality. *Front Plant Sci.* 9:1–10.
- Senatore, F. (1996).** Influence of harvesting time on yield and composition of the essential
- Sharif J., Afyuni M., Khoshgoftarmanesh A. H. (2017).** Effect of sewage sludge and composts on soil properties and growth of wheat. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(3), 662-676.
- Silva L. R., Pereira M. J., Afonso S. (2019).** Physicochemical parameters and stability of essential oils: A comparative study on storage conditions. *Industrial Crops and Products*, 132, 213-220.
- Singer SD., Zoub J., Weselake RJ. (2016).** Abiotic factors influence plant storage lipid accumulation and composition. *Plant sci*, 1:1–10.
- Souadia A. (2022).** Chemical composition and antioxidant activity of *Thymus ciliatus* (Desf.) Benth. Essential oils of Algeria. *Natural Product Communications*, 17(2)
- Souiy Z, (2023)** Essential Oil Extraction Process, DOI : 10.5772/intechopen.113311.
- Souiy Z., Zakhama N., Cheraief I., Hammami M. (2022).**Nutritional, physical, microbial, and sensory characteristics of gluten-and sugar-free cereal bar enriched with spirulina and flavored with neroli essential oil, *LWT*.;169:113955
- Spichiger R., Savolainen V., Figeat M., Jeanmonod. (2002).** Diversité floristique et biogéographie des Lamiacées. *Revue de Botanique*, 45 (3), p. 112-118.
- Tisserand R., Young R. (2013).** Essential Oil Safety: A Guide for Health Care Professionals, Elsevier Health Sciences, United Kingdom.
- Tongnuanchan P., Benjakul SZ. (2014).** Essential oils: Extraction, bioactivities, and their uses for food preservation, *Journal of Food Sscience*; 79 (7): R1231-R1249.
- Tripathi P., Tripathi J., et Kumar S. (2009).** Étude des perspectives des huiles essentielles comme biopesticides dans la lutte contre les insectes nuisibles. *Journal of Pharmacognosy and Phytotherapy* , 5 (1). 52–63.
- Turek C., Stintzing F.C. (2013).** Stability of essential oils: a review. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 12 (1), 40-53.
- Verma N., Shukla S. (2015).** Impact of various factors responsible for fluctuation in plant secondary metabolites, *J. Appl, Res, Med, Arom. Plant*, 2015, 2 (4), 105–113.
- Z. (2011).** Caractérisation chimique et relations génétiques entre les cultivars d'*Ocimum basilicum* L. *Chimie & biodiversité*, 8 (11) 1978–1989.
- Zhao J., Davis L. C., Verpoorte R. (2017).** Totipotency and plant regeneration. *Plant Cell Reports*, 36(3), 1–12.

Zhiri A., Baudoux D. (2005). Huiles essentielles chémotypées et leurs synergies.

Zuzarte M., & Salgueiro L. (2015). Essential oils chemistry. *Bioactive essential oils and cancer*, 19-61.

Zuzarte M., Gonçalves M. J., Cruz MT., Cavaleiro C., Vaz S., Canhoto J., Vaz S., Pinto E., Salgueiro L.(2012). Lavandula luisieri essential oil as a source of antifungal drugs. *Food Chemistry 135 (3), 1505-1510* .

.

ANNEXES

Annexe 1 : Analyses statistiques des propriétés physico-chimiques des HEs

1. Paramètre d'analyse de la variance du rendement

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	des F	Pr > F
Modèle	2	2,0723	1,0361	362,8521	< 0,0001
Erreur	6	0,0171	0,0029		
Total corrigé	8	2,0894			

Calculé contre le modèle $Y=\text{Moyenne}(Y)$

2. Paramètre d'analyse de la variance de l'Indice d'acide

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	des F	Pr > F
Modèle	2	7,6023	3,8011	217,3463	< 0,0001
Erreur	6	0,1049	0,0175		
Total corrigé	8	7,7072			

Calculé contre le modèle $Y=\text{Moyenne}(Y)$

3. paramètre d'analyse de la variance de la densité

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	0,0085	0,0042	11,9386	0,0081
Erreur	6	0,0021	0,0004		
Total corrigé	8	0,0106			

Calculé contre le modèle $Y=\text{Moyenne}(Y)$

4. paramètre d'analyse de la variance de l'Indice d'iode

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	2,4438	1,2219	9,1180	0,0152
Erreur	6	0,8041	0,1340		
Total corrigé	8	3,2479			

Calculé contre le modèle $Y=\text{Moyenne}(Y)$

Annexes

5. Paramètre d'analyse de la variance de l'Indice d'ester

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	46777,1635	23388,5817	25,6453	0,0011
Erreur	6	5472,0074	912,0012		
Total corrigé	8	52249,1709			

Calculé contre le modèle $Y=Moyenne(Y)$

6. Paramètre d'analyse de la variance de l'Indice de saponification

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	46444,9572	23222,4786	24,6741	0,0013
Erreur	6	5646,9985	941,1664		
Total corrigé	8	52091,9557			

Calculé contre le modèle $Y=Moyenne(Y)$

Annexes

Annexe 2 : Analyses statistiques des paramètres physico-chimiques des sols

1. Paramètres d'analyse de la variance du PH_{eau}

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	0,3129	0,1564	13,7759	0,0057
Erreur	6	0,0681	0,0114		
Total corrigé	8	0,3810			

Calculé contre le modèle $Y=\text{Moyenne}(Y)$

2. Paramètre d'analyse de la variance ph_{kcl}

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	0,7534	0,3767	15,2104	0,0045
Erreur	6	0,1486	0,0248		
Total corrigé	8	0,9020			

Calculé contre le modèle $Y=\text{Moyenne}(Y)$

3. Paramètre d'analyse de la variance de la conductivité électronique

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	71168,1632	35584,0816	1632,0378	< 0,0001
Erreur	6	130,8208	21,8035		
Total corrigé	8	71298,9840			

Calculé contre le modèle $Y=\text{Moyenne}(Y)$

4. Paramètre d'analyse de la variance de Carbone

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	3,1876	1,5938	19,1528	0,0025
Erreur	6	0,4993	0,0832		
Total corrigé	8	3,6868			

Calculé contre le modèle $Y=\text{Moyenne}(Y)$

5. Paramètre d'analyse de la variance de l'Azote

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	0,0052	0,0026	0,5259	0,6160

Annexes

Erreur	6	0,0296	0,0049
Total corrigé	8	0,0347	

Calculé contre le modèle $Y=Moyenne(Y)$

6. Paramètre d'analyse de la variance du Phosphore

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	0,1264	0,0632	35,8289	0,0005
Erreur	6	0,0106	0,0018		
Total corrigé	8	0,1370			

Calculé contre le modèle $Y=Moyenne(Y)$

7. Paramètre d'analyse de la variance du Calcium

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	13,3528	6,6764	228,1234	< 0,0001
Erreur	6	0,1756	0,0293		
Total corrigé	8	13,5284			

Calculé contre le modèle $Y=Moyenne(Y)$

8. Paramètre d'analyse de la variance du Magnésium

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	0,1646	0,0823	0,7934	0,4946
Erreur	6	0,6224	0,1037		
Total corrigé	8	0,7870			

Calculé contre le modèle $Y=Moyenne(Y)$

9. Paramètre d'analyse de la variance du Sodium

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	25,1385	12,5692	2,3345	0,1779
Erreur	6	32,3050	5,3842		
Total corrigé	8	57,4435			

Calculé contre le modèle $Y=Moyenne(Y)$

Annexes

10. Paramètre d'analyse de la variance du Potassium

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	0,0502	0,0251	0,7126	0,5276
Erreur	6	0,2113	0,0352		
Total corrigé	8	0,2615			

Calculé contre le modèle $Y=\text{Moyenne}(Y)$

11. Paramètre d'analyse de la variance de la Matière organique

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	9,4740	4,7370	19,1528	0,0025
Erreur	6	1,4840	0,2473		
Total corrigé	8	10,9579			

Calculé contre le modèle $Y=\text{Moyenne}(Y)$

12. Paramètre d'analyse de la variance de l'Argile

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	0,2366	0,1183	0,0047	0,9953
Erreur	6	151,4732	25,2455		
Total corrigé	8	151,7097			

Calculé contre le modèle $Y=\text{Moyenne}(Y)$

13. Paramètre d'analyse de la variance du Limon

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	483,8207	241,9103	3,9031	0,0821
Erreur	6	371,8737	61,9790		
Total corrigé	8	855,6944			

Calculé contre le modèle $Y=\text{Moyenne}(Y)$

14. Paramètre d'analyse de la variance du Sable

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	463,3891	231,6946	7,5252	0,0232
Erreur	6	184,7338	30,7890		
Total corrigé	8	648,1229			

Calculé contre le modèle $Y=\text{Moyenne}(Y)$

Annexes

Annexe 3 : Contributions des variables%

Contributions des variables (%) :		
	F1	F2
Rdt (%)	4,1738	0,0944
Ia	4,1915	0,0488
Ii	3,9525	0,6624
Ie	0,0341	10,7232
Is	0,0462	10,6921
pH eau	0,5525	9,3921
pHKCl	0,5147	9,4890
Cond	1,9975	5,6821
N	3,0507	2,9778
P	3,8156	1,0140
K	4,2100	0,0014
C	4,2096	0,0025
MO	4,2096	0,0025
Na	2,1261	5,3519
Ca	3,9621	0,6380
Mg	0,3473	9,9190
Sable	3,9499	0,6691
Limon	3,9380	0,6999
Argile	3,1749	2,6591
C/N	2,8538	3,4836
C/P	4,0880	0,3147
C/K	0,1653	10,3863
P/K	1,9171	5,8884
T°C	4,2094	0,0028
It	4,2100	0,0013
Ic	3,2647	2,4285
Io	3,9169	0,7540
Iov	3,7740	1,1208
Pv (mm)	3,0810	2,9001
Tp°C	4,1597	0,1304
Tn°C	4,1360	0,1914
Tv°C	4,1032	0,2757
Pp(mm)	3,6644	1,4023

Contributions des variables (%) :		
	F1	F2
Rdt (%)	4,1738	0,0944
Ia	4,1915	0,0488
Ii	3,9525	0,6624
Ie	0,0341	10,7232

Annexes

Is	0,0462	10,6921
pH eau	0,5525	9,3921
pHKCl	0,5147	9,4890
Cond	1,9975	5,6821
N	3,0507	2,9778
P	3,8156	1,0140
K	4,2100	0,0014
C	4,2096	0,0025
MO	4,2096	0,0025
Na	2,1261	5,3519
Ca	3,9621	0,6380
Mg	0,3473	9,9190
Sable	3,9499	0,6691
Limon	3,9380	0,6999
Argile	3,1749	2,6591
C/N	2,8538	3,4836
C/P	4,0880	0,3147
C/K	0,1653	10,3863
P/K	1,9171	5,8884
T°C	4,2094	0,0028
It	4,2100	0,0013
Ic	3,2647	2,4285
Io	3,9169	0,7540
Iov	3,7740	1,1208
Pv (mm)	3,0810	2,9001
Tp°C	4,1597	0,1304
Tn°C	4,1360	0,1914
Tv°C	4,1032	0,2757
Pp(mm)	3,6644	1,4023

Résumé

Ce travail vise à étudier l'influence des facteurs environnementaux (climat, sol, altitude) sur la variabilité des huiles essentielles d'une espèce de *Thymus* endémique d'Algérie. Trois morphotypes ont été prélevés dans les régions de Béjaïa, Tizi Ouzou et Sétif. Les huiles essentielles ont été extraites par hydrodistillation, puis analysées selon plusieurs paramètres physico-chimiques. Les résultats montrent que le rendement et la qualité des huiles varient significativement selon les conditions écologiques locales. Cette étude met en évidence l'importance des facteurs pédoclimatiques dans la biosynthèse des huiles essentielles et ouvre des perspectives pour leur valorisation durable.

Mots-clés : *Thymus*, huiles essentielles, facteurs environnementaux, hydrodistillation, pédoclimat, variabilité chimique, Algérie.

Abstract

This study aims to investigate the influence of environmental factors (climate, soil, altitude) on the variability of essential oils from a *Thymus* species endemic to Algeria. Three morphotypes were collected from Béjaïa, Tizi Ouzou, and Sétif. The essential oils were extracted using hydrodistillation and analyzed through various physicochemical parameters. The results reveal that oil yield and quality vary significantly depending on local ecological conditions. This research highlights the role of pedoclimatic factors in the biosynthesis of essential oils and opens up prospects for their sustainable valorization.

الملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير العوامل البيئية (المناخ، التربة، الارتفاع) على تباين الزيوت الأساسية لنوع من نبات الزعتر المتوطن في الجزائر. تم جمع ثلاثة مورفوتيبات من مناطق بجاية، تيزي وزو، وسطيف. تم استخراج الزيوت الأساسية باستخدام طريقة التقطير المائي، ثم تحليلها وفقاً لعدة معايير فيزيائية وكيميائية. أظهرت النتائج أن مردود وجودة الزيوت تختلف باختلاف الظروف البيئية المحلية. وتؤكد هذه الدراسة على أهمية العوامل البيئية الترابية والمناخية في إنتاج الزيوت الأساسية، مما يفتح آفاقاً لاستغلالها بشكل مستدام.