

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA - Béjaïa

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des sciences biologiques de l'environnement
Spécialité Ecologie



Réf :.....

Mémoire de Fin de Cycle
En vue de l'obtention du diplôme

MASTER

Thème

Effet des facteurs pédoclimatiques sur les rendements et les propriétés physico-chimiques des huiles essentielles de trois morphotypes du *Thym*

Présenté par :
Bezghiche Rym
Salhi Nora El Houda

Soutenu le :

Devant le jury composé de :

M. Ramdani N	MCB	Président
M. Adjaoud A	MCB	Encadreur
M. Benkhenouche N	MAA	Examineur

Année universitaire : 2023 / 2024

Remerciements

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur, Monsieur **ADJAUD. A** d'avoir accepté de nous encadrer, qu'il trouve ici l'expression de nos profondes gratitude tant pour nous avoir accordé sa confiance, que pour son encadrement attentif, que pour nous avoir guidés dans ce travail.

Ses connaissances approfondies du sujet et ces orientations judicieuses, sa disponibilité, sa surveillance, sa gentillesse et surtout son expertise nous ont été d'une aide inestimable.

Nos remerciements seront adressés aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail et pour leurs remarques constructives qui nous ont permis d'améliorer la qualité de notre mémoire.

Nous tenons à exprimer notre très grande considération et nos vives gratitude à notre président de jury, monsieur **RAMDANI. N** de nous avoir tendu la main, tant pour son Dévouement incomparable et sa générosité.

On le remercie vivement pour sa collaboration et sa disponibilité permanente. Nous remercions également monsieur **BENKHENNOUCHE.N** d'avoir accepté d'examiner ce mémoire, on tient à lui exprimer notre sincère reconnaissance et notre profond respect.

DÉDICACES

Je dédie ce précieux travail à tous ceux qui ont contribué pour la
réalisation de ce travail de près ou de loin, à tous ceux qui m'ont tendu la
main et à tous ceux qui m'ont orienté dans la bonne direction
A ceux qui m'ont indiqué la bonne voie, à ceux qui ont attendu avec
Patience le fruit de leur bonne éducation

A

* MES CHERS PARENTS

* MES CHERS SOEURS ET FRÈRES

* A MES ADORABLES NEUVEUX ET NIÈCES

* MES AMIS, MES CAMARADES DE PROMOTION AINSI QUE MES
ENSEIGNANTS

SALHI

Liste des figures

Figure 1 : Répartition géographique du <i>Thym</i> dans le monde.....	7
Figure 2 : Schéma d'un appareil de type Clevenger	11
Figure 3 : Principe d'entraînement à la vapeur d'eau et d'hydro diffusion.....	11
Figure 4 : Dispositifs d'extraction par solvants volatiles	12
Figure 5 : Une représentation simplifiée d'une installation d'extraction au CO ₂ supercritique	14
Figure 6 : Photographie des trois morphotypes de Thym	20
Figure 7 : Dessin schématique d'hydrodistillateur de type Clevenger	22
Figure 8 : photographie d'un pycnomètre.....	23
Figure 9 : Photographie du réfractomètre d'Abbe.....	24
Figure 10 : Photographie d'un polarimètre de Laurent.....	25
Figure 11 : Photographie d'une Tamiseuse automatique.....	28
Figure 12 : Photographie du pH mètre	28
Figure 13 : Photographie du conductimètre.....	29
Figure 14 : photographie de l'appareillage du dosage du carbone (Anne modifiée)	29
Figure 15 : Photographie A-B des appareils de minéralisation et de distillation UDK 142 (VELP)	30
Figure 16 : Photographie du spectrophotomètre.....	30
Figure 17 : Photographie du photomètre à flamme.....	31
Figure 18 : Rendement en HES des différents morphotypes de Thym étudié.....	34
Figure 19 : les triangles de texture USDA des sols étudiés (A-B-C).....	39
Figure 20 : Evolution spatiale des propriétés physico-chimiques des sols étudiés.....	40
Figure 21 : Evolution spatiale des propriétés physico-chimiques des sols étudiés.....	42
Figure 22 : Cercle de corrélation de l'ACP.....	48
Figure 23 : contribution des observations	49
Figure 24 : biplot de l'ACP.....	50

Liste des tableaux

Tableau 1 : Position systématique de l'espèce étudiée.....	21
Tableau 2 : Caractéristiques des sites de récolte	21
Tableau 3 : Caractéristiques organoleptiques des huiles essentielles du Thym étudié	34
Tableau 4 : Propriétés physicochimiques des huiles essentielles des trois morphotypes de thym étudiés.....	36
Tableau 5 : Propriétés physique des sols	38
Tableau 6 : Résultats des analyses climatique et bioclimatiques.....	44
Tableau 7 : Matrice de corrélation des propriétés physico chimique des sols étudiés	45
Tableau 8 : p-value du test de de corrélation des propriétés physico chimique des sols étudiés	45
Tableau 9 : Paramètres du GIM des éléments minéraux majeures, carbone et matière organique et les rapports C/N et C/P des sols avec les rendements des HEs	46
Tableau10 : paramètres du GIM des sels solubles, du pH et de la conductivité électrique avec les rendements des HEs	46
Tableau 11 : Paramètres du GIM des éléments de textures des sols avec le rendement des HEs	47
Tableau 12 : Paramètres du GLM des éléments minéraux majeurs, carbone et matière organique et les rapport C/N et C/P des sols avec l'indice d'acide des HEs	47
Tableau 13 : Paramètres du GLM des des sels solubles, du pH et de la conductivité électrique avec l'indice d'acide	47
Tableau 14 : Paramètres du GLM des éléments de texture des sols ave l'indice d'acide des HEs	47
Tableau 15 : Les valeurs propres de variables	48

Liste des abréviations

A% : pourcentage d'argile

AFNOR : Association Française de Normalisation

AFSSAPS : l'agence française de sécurité sanitaire des produits de santé

AO : Ait Ouabane

C/N : Carbone organique / Azote

CE : Conductivité électrique

CH: Chellata

CO: Carbone organique

CPG : Chromatographie en phase gazeuse

CPG/SM : Chromatographie en phase gaz couplée à une spectroscopie masse

CPG/SM : Couplage chromatographie phase gazeuse/ spectrométrie de masse

DO : La densité optique

H₂SO₄ : l'acide sulfurique concentré

HCl : l'acide chlorhydrique

HEs : Huiles essentielles

Ip : Indice de peroxyde

IR : Indice de refraction

Is : Indice de saponification

ISO : International Standard Organisation

It : Indice thermique

KCl : chlorure de potassium

KOH: hydroxyde de potassium (potasse caustique)

L % : pourcentage de limon

MO : Matière organique

Na₂S₂O₃ : Solution de thiosulfate de sodium

NH₄⁺ : L'azote ammoniacal

pH : Potentiel hydrique

Pp (mm) : Précipitation annuelles

ppm : particule par million

PR : Pouvoir rotatoire

Pv (mm) : Précipitation estivales

Rdt% : Rendements en pourcentage

S%: pourcentage de sable

TG : Tala Guillef

USDA : United states department of agriculture

UV : Ultra violet

WBCS: World BioClimatic System

GLM : Generalized linear model (Modèle linéaire généralisé)

ACP : analyse en composantes principales

Résumé

L'objectif de cette étude était d'étudier l'impact des facteurs pédoclimatiques sur la variation qualitative et quantitative des huiles essentielles extraites de trois morphotypes d'une espèce du genre *Thymus* récoltés au niveau de Chelatta, d'Ait- Ouaabane et de Tala-Guilef. Les huiles essentielles, extraites par hydrodistillation, des parties ariennes fleuries de cette espèce ont été soumises à des analyses physiques (densité, indice de réfraction et le pouvoir rotatoire) et chimiques (indice d'acide, indice d'ester, indice d'iode, indice de saponification). Elles présentent des rendements fort appréciables allant de 1,38 % à 1,77 %, d'une qualité supérieure exprimée par les indices physico-chimiques analysés. Ces caractéristiques varient d'un morphotype à un autre et analysées par l'interaction des facteurs pédoclimatiques. Ces morphotypes se distribuent selon certains indices bioclimatiques dans un étage climatique de type méso-méditerranéen supérieur selon l'indice de thermicité, (It), ombrotype sub-humide selon l'indice ombrothermique annuel (Io) et d'une continentalité littorale selon Ic. Les sols où poussent ces espèces présentent des textures où les limons dominent. Ils sont légèrement acides à alcalin, pauvres en matière organique, en azote et présentent des faibles taux en d'autres éléments minéraux.

Mots clés : Thym, morphotype, huiles essentielles, climat, pédologie.

Abstract

The aim of this study was to investigate the impact of pedoclimatic factors on the qualitative and quantitative variation of essential oils extracted from three morphotypes of a species of the genus *Thymus* harvested at Chelatta, Ait-Ouaabane and Tala-Guilef. Essential oils extracted by hydro-distillation from the flowering parts of this species were subjected to physical (density, refractive index and rotatory power) and chemical (acid index, ester index, iodine index, saponification index) analyses. Yields range from 1.38% to 1.77%, with superior quality expressed by the physico-chemical indices analyzed. These characteristics vary from one morphotype to another, and are analyzed through the interaction of pedoclimatic factors. These morphotypes are distributed according to certain bioclimatic indices in a climatic stage of the upper Meso-Mediterranean type according to the thermicity index (It), a sub-humid ombrotype according to the annual ombrothermal index (Io) and a littoral continental type according to Ic. The soils in which these species grow are predominantly loamy in texture. They are slightly acidic to alkaline, poor in organic matter and nitrogen, and have low levels of other mineral elements.

Key words: Thyme, morphotype, essential oils, climate, pedology.

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

page

Introduction 1

Chapitre I : Revue bibliographique

1. Généralités sur les huiles essentielles 3
2. Importance économique et écologique des huiles essentielles.....4
 - 2.1. Importance écologique4
 - 2.2. Importance économique5
3. Utilisation des huiles essentielles5
4. Présentation du genre *Thymus*6
 - 4.1. Caractéristique botanique6
 - 4.2. Distribution géographique.....6
 - 4.2.1. Dans le monde6
 - 4.2.2. En Algérie.....7
5. Facteurs pédoclimatiques7
 - 5.1. Facteurs pédoclimatiques influençant la croissance des plantes7
 - 5.2. Effet des facteurs pédoclimatique sur les huiles essentielles8
 - 5.3. L'influence des facteurs pédoclimatique sur le genre *Thymus*8
 - 5.4. L'impact des variations pédoclimatiques sur le rendement et la qualité des huiles essentielles du *Thymus*9
 - 5.5. Modélisation des effets pédoclimatique sur les plantes.....9
6. Techniques d'extraction des huiles essentielles10
7. Technique d'analyse des composantes des huiles essentielles15
8. Evaluation des propriétés physico-chimiques des huiles essentielle.....17

Chapitre II : matériels et méthodes

1. Matériel végétal20
 - 1.1. Description botanique.....20

1.2. Position systématique	20
2. Echantillonnage et extraction des huiles	21
3. Propriétés physico chimiques	27
4. Analyses physico-chimiques des sols.....	31
5. Les données climatiques.....	31
6. Analyse statistique des données	33
Chapitre III : Résultats et discussion	
1. Rendement et caractéristique organoleptique.....	34
2. Propriétés physicochimiques des huiles essentielles	36
3. Analyse des paramètres des sols	38
4. Analyse des indices climatiques et bioclimatiques	43
5. Relation entre les paramètres édaphiques.....	44
6. Effets des propriétés du sol sur la production des HEs... ..	46
7. Facteurs écologiques affectant la variabilité quantitative et qualitative des HEs	48
7.1. Analyse en composante principale	48
7.1.1. Valeur propre des variables	48
7.1.2. Cercle de corrélation	48
Conclusion	51
Références Bibliographiques	53
Annexes	

INTRODUCTION

Les plantes sont la source d'oxygène sur le globe ; elles sont connues pour leur valeur ornementale, pour fournir les matières premières utilisées pour la fabrication de vêtements et la construction (**Figueiredo *et al.*, 2008**). En raison de la totipotence cellulaire accompagnée d'une multiplication indéfinie, les plantes jouent le rôle de producteurs primaires dans la plupart des écosystèmes (**Dupont et Guignard, 2012**). Les plantes sont la première source de nourriture fournissant des hydrates de carbone, des protéines, des lipides et des vitamines appelés métabolites primaires. En outre, les plantes produisent un grand nombre de molécules appelées métabolites secondaires ayant une importance pharmacologique, industrielle, écologique et économique.

Les métabolites secondaires sont le résultat d'un processus éco-physiologique complexe dans le métabolisme des plantes. Les plantes synthétisent ces composés organiques pour faire face aux contraintes environnementales et aux interactions biotiques négatives, en tant qu'outil de défense contre les pathogènes et les prédateurs. Ainsi, les métabolites secondaires permettent aux plantes de s'adapter aux changements de leur environnement et d'assurer une meilleure croissance et un meilleur succès de reproduction. En raison de leur apparence et de leur évolution, les plantes ont établi différentes relations avec d'autres êtres vivants par le biais de métabolites secondaires tels que les huiles essentielles (HEs), les flavonoïdes, les alcaloïdes et les glycosides (**Guignard *et al.*, 1985**). De plus, les plantes répondent aux conditions environnementales par la synthèse de plusieurs métabolites secondaires et/ou de nouvelles molécules dotées d'activités biologiques et physiologiques importantes et constituent les moyens de défense et d'adaptation des plantes (**Guignard *et al.*, 1985 ; Figueiredo *et al.*, 2008 ; Reynaud, 2011 ; Ni *et al.*, 2021**).

Chez les plantes aromatiques, les HEs jouent un rôle multiple dans la résistance aux conditions environnementales difficiles, car elles peuvent servir de réserve d'énergie en cas de conditions défavorables. Elles sont les meilleurs métabolites aromatiques synthétisés par différentes espèces de plantes et jouent un rôle crucial dans l'économie moderne puisqu'elles sont utilisées en phytothérapie et dans les domaines industriels ; agroécologiques et pharmacologiques.

Compte tenu de leur caractère aromatique, les Lamiacées occupent une place économique importante (**Bruneton, 2001**). De nombreuses plantes de cette famille botanique produisent des quantités importantes d'huiles volatiles (**Franchomme, 1999 ; Guignard,**

2000 ; Bruneton, 2001 ; Riahi *et al.*, 2013). Parmi elles, les espèces du genre *Thymus* dont certaines sont endémiques de l'Algérie. Ces espèces constituent des populations végétales importantes inféodées à des habitats particuliers. Toutefois, plusieurs facteurs affectent le rendement et la qualité des HEs des plantes aromatiques du genre *Thymus*, à savoir le facteur génétique qui joue un rôle essentiel dans la détermination de la composition et du rendement des HEs, qui varient en fonction de l'âge, du cycle végétatif et de l'organe de la plante utilisé pour l'extraction (Bouyahya *et al.*, 2017 ; Madhumita *et al.*, 2019 ; Ni *et al.*, 2021). En outre, les conditions environnementales, principalement les facteurs climatiques et édaphiques liés à la situation géographique, les variations physiologiques, l'heure et la saison de la récolte (Russo *et al.*, 1998 ; Perry *et al.*, 1999 ; Figueiredo *et al.*, 2008 ; Msaada *et al.*, 2009) ont également un rôle essentiel dans la détermination de la composition et du rendement des HEs.

C'est dans ce cadre que s'inscrit notre travail qui a pour but principale l'étude de la variation quantitative et qualitative des HEs extraites de trois morphotypes de *Thym* en relation avec les facteurs pédoclimatiques.

Chapitre I : Revue bibliographique

1. Les Huiles Essentielles

Les huiles essentielles (HEs) sont des substances volatiles et odorantes présentes dans les plantes aromatiques, responsables des différentes odeurs qu'elles dégagent. Elles sont obtenues par entraînement à la vapeur d'eau, hydrodistillation ou expression mécanique, et se forment dans de nombreuses plantes comme produits du métabolisme secondaire (**El Asbahani et al., 2015**). Ces huiles sont des mélanges liquides très complexes, possédant des propriétés et des modes d'utilisation spécifiques, donnant naissance à une branche de la phytothérapie appelée aromathérapie.

Historiquement, les huiles essentielles ont toujours occupé une place importante dans la vie quotidienne de l'homme, utilisées pour se parfumer, aromatiser la nourriture ou même pour des soins médicaux. Elles se trouvent dans des glandes minuscules situées dans différentes parties de la plante aromatique : feuilles, fleurs, fruits, graines, écorce et, pour certaines plantes, racines (**El Asbahani et al., 2015**).

Le terme "huile essentielle" a été inventé au 16^{ème} siècle par le médecin suisse Paracelsus von Hohenheim pour désigner le composé actif d'un remède naturel (**Guenther, 1948**). Environ 3000 huiles essentielles sont connues, dont environ 300 sont commercialisées, principalement destinées à l'industrie des arômes et des parfums (**Lawless, 1996 ; Lis-Balchin, 2006 ; Turek & Stintzing, 2013**).

La norme AFNOR NF T 75-006 définit l'huile essentielle comme un produit obtenu à partir d'une matière première végétale, soit par entraînement à la vapeur d'eau, soit par hydrodistillation. L'huile essentielle est séparée de la phase aqueuse par des procédés physiques. Ces huiles dégagent une odeur caractéristique et sont généralement plus légères que l'eau, tout en possédant des caractéristiques hydrophobes. Lors de la distillation, les molécules légères sont entraînées par la vapeur d'eau, l'huile se sépare de l'eau du distillat, mais une petite partie persiste dans l'eau, donnant naissance à ce qu'on appelle l'eau aromatique (**Bruneton, 2009 ; Kaloustian & Hadji-Minaglou, 2012 ; Dhifi et al., 2016**).

Certains auteurs définissent les huiles essentielles comme des assemblages complexes de composés volatils, souvent accompagnés d'une fraction aqueuse résiduelle issue de leur extraction par hydrodistillation. Cette conceptualisation inclut également les essences extraites

par pression à froid des écorces ou zestes des agrumes du genre Citrus, où l'eau participe indirectement dans les méthodes mécaniques visant à libérer les substances des cavités oléifères (**Garnero, 1998**).

Duquénois en 1979 souligne l'absence d'une définition standardisée des huiles essentielles, notant que la conceptualisation de ces substances varie selon les disciplines professionnelles. Ainsi, botanistes, industriels, parfumeurs et pharmacologues adoptent des définitions qui reflètent les exigences et les applications propres à leurs domaines d'expertise.

2. Importance économique et écologique des huiles essentielles

2.1. Importance écologique

Selon **Javad Sharifi-Rad et al., 2017**, les huiles essentielles jouent un rôle fondamental dans la survie et le succès des plantes qui les produisent. Elles offrent une protection contre les prédateurs, facilitent la pollinisation, protègent contre les micro-organismes, régulent la croissance des plantes et aident à l'adaptation aux conditions environnementales.

Les huiles essentielles protègent les plantes contre les prédateurs tels que les insectes et les mammifères en les repoussant ou en les intoxiquant. Cette capacité de défense est cruciale pour la survie des plantes dans des environnements où les prédateurs sont omniprésents. En ce qui concerne la pollinisation, les pollinisateurs comme les abeilles et les papillons sont attirés par certaines huiles essentielles, ce qui favorise la pollinisation des plantes. Cette attraction est essentielle pour la reproduction des plantes et la production de fruits et de graines. (**Regnault-roger et al., 2012 ; Tripatji et al., 2009**).

Les propriétés antimicrobiennes des huiles essentielles protègent les plantes contre les micro-organismes, tels que les bactéries et les champignons, susceptibles de provoquer des maladies. Cette protection permet aux plantes de rester en bonne santé et de croître de manière optimale dans leur environnement naturel. (**Vidyasagar et al**)

Les huiles essentielles peuvent également influencer la croissance des plantes en inhibant la germination ou la croissance d'autres plantes susceptibles de concurrencer la plante qui les a produits. Cette capacité à contrôler la croissance des végétaux environnants permet aux plantes productrices d'huiles essentielles de réduire la compétition pour les ressources telles que l'eau, les nutriments et la lumière. Enfin, les plantes peuvent bénéficier des huiles essentielles pour s'ajuster aux conditions environnementales difficiles, comme la sécheresse ou la chaleur. Par exemple, certaines huiles essentielles peuvent aider à diminuer la perte d'eau en

réduisant l'évaporation ou en préservant les feuilles des dommages causés par des températures extrêmes. Cette adaptation aux circonstances écologiques permet aux plantes de survivre et de prospérer même dans des conditions défavorables (**Chou, 1999 ; Bohren. Ch et al., 2005**)

2.2. Importance économique

La production des huiles essentielles varie considérablement en fonction des plantes et des espèces. Cette variabilité dans le rendement justifie la nécessité de recruter une main-d'œuvre importante pour les différentes étapes de la chaîne de production, incluant l'exploitation, le transport et la transformation des matières premières. (**Théophane, 2019**)

Le marché mondial des huiles essentielles connaît une croissance continue et soutenue chaque année. Selon le Centre de Commerce International de Genève (1984), ce marché a enregistré une augmentation de 200 millions de dollars en l'espace de cinq ans. Cette expansion est principalement attribuée à l'intérêt croissant pour la médecine traditionnelle en Asie, ainsi qu'à la demande accrue pour des produits naturels en Europe et en Amérique du Nord (**Moja. S ; Jullien.F,2014**).

3. Utilisations des huiles essentielles

Les huiles essentielles, extraites de différentes parties végétales telles que les racines, les feuilles, les graines et les fleurs, présentent une grande variété d'applications selon la géographie des plantes. En effet, ces huiles peuvent être utilisées dans divers domaines, notamment :

- En pharmacie, où elles peuvent avoir un intérêt médicamenteux, notamment en tant qu'antiseptiques, et sont souvent employées pour aromatiser les formes médicamenteuses orales. De plus, elles constituent la base de l'aromathérapie, une médecine complémentaire (**Bruneton, 2009**) qui propose des solutions alternatives aux problèmes de santé, en particulier face à la résistance croissante des microbes et des germes aux antibiotiques. (**Richard, 1992**).
- Dans l'industrie agroalimentaire, les huiles essentielles sont utilisées comme agents naturels de conservation des aliments, en raison de leurs propriétés antimicrobiennes et antioxydantes, (**Conner, 1993**). Elles sont également employées comme agents aromatisants naturels, leur part dans l'aromatisation des aliments ne cessant de croître. (**Bruneton, 1993**)
- En parfumerie, les huiles essentielles sont intégrées dans divers produits cosmétiques et de soins personnels, tels que des antalgiques pour la peau, des produits solaires des

huiles de massage, des dentifrices, etc, (**Madhavi et al.,1996**). Bien que leur coût soit élevé, elles sont très prisées pour leurs propriétés aromatiques et thérapeutiques. (**Bruneton,2009**).

4. Présentation du genre *Thymus*

Le terme “Thym” trouve son origine dans le mot grec “Thymos”, qui signifie “odeur”. En raison de son arôme distinctif, cette plante est largement utilisée comme herbe aromatique, notamment comme condiment dans la cuisine méditerranéenne (**Richard et al., 1985**).

4.1. Caractéristiques botaniques

Le genre *Thymus* est l’un des huit genres les plus importants en termes de nombre d’espèces au sein de la famille des Lamiacées, qui comprend environ 220 genres. Toutefois, ce nombre peut varier selon les perspectives taxonomiques. En se basant sur certains critères, les données disponibles indiquent que le genre *Thymus* compte environ 215 espèces (**Morales, 2002**).

Le thym est largement répandu dans l’Ancien Monde, avec la région méditerranéenne, en particulier la Méditerranée occidentale, servant de centre principal pour ce genre. En dehors de cette région, seules les espèces de deux sections sont présentes. La péninsule ibérique et le nord-ouest de l’Afrique abritent sept sections, dont cinq sont endémiques. La péninsule ibérique, à elle seule, compte 35 espèces de thym, dont 24 sont endémiques (**Stahl-Biscup et al., 2002**).

4.2. Distribution géographique

4.2.1. Dans le monde

Il est plausible de suggérer que l’origine de certains taxons du genre *Thymus* se situe dans la région méditerranéenne, étant donné que les sections *Serpyllum* et *Micantes* y sont présentes depuis le Paléocène. Au cours du Miocène, certaines espèces des sections *Thymus* et *Hyphodromi* ont émergé. Pendant le Quaternaire, les ancêtres de la section *Serpyllum* et, dans une certaine mesure, ceux de la section *Hyphodromi* ont initié de nouveaux processus de spéciation, colonisant toutes les terres libérées de glace après la dernière période glaciaire. Ces processus de spéciation ne sont pas encore achevés, ce qui pourrait expliquer pourquoi il est souvent difficile de distinguer clairement toutes ces espèces. On peut supposer qu’elles sont en cours de différenciation, évoluant vers des espèces distinctes (**Morales, 1989**).

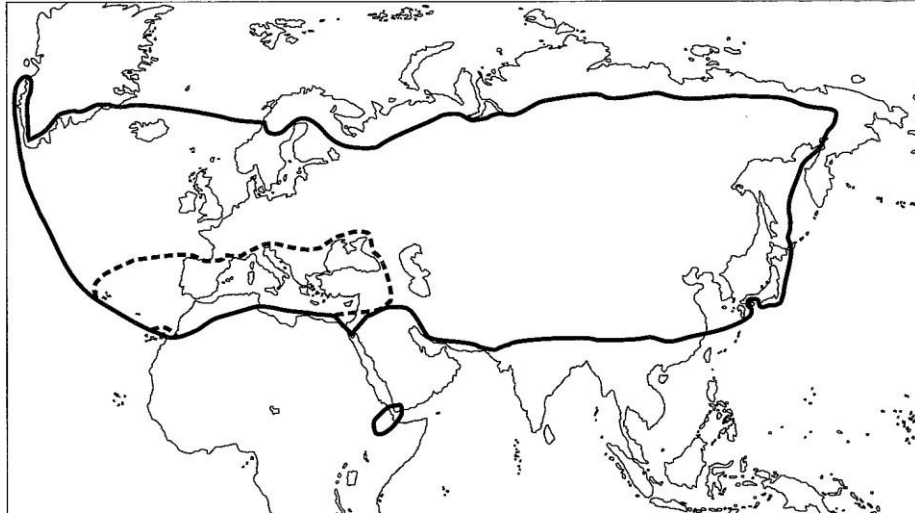


Figure 1 : Répartition géographique du thym dans le monde (Stahl-Biskup, 2002)

4.2.2. En Algérie

L'Algérie est réputée pour sa richesse en plantes médicinales en raison de sa superficie et de sa variété bioclimatique, les espèces botaniques du genre *Thymus* se trouvent réparties sur tout le littoral, y compris dans les régions internes jusqu'aux zones arides (Hammaz et Nafa, 2017). Selon Quezel et Santa (1963), il existe 12 espèces de *Thymus* dans la région algérienne, dont huit sont endémiques (Dob et al., 2006). De plus, le thym est une plante commune en Algérie, avec des espèces réparties sur tout le territoire national, allant du Nord Algérois à l'Atlas saharien, et du Constantinois à l'Oranais (Kabouche, 2005).

5. Facteurs pédoclimatiques

D'après (Gautreau, 1973), les facteurs pédoclimatiques se réfèrent à l'interaction entre des facteurs pédologiques (liés au sol) et des facteurs climatiques qui peuvent limiter et influencer la croissance des plantes. Ces facteurs pédoclimatiques définissent un "climat interne" du sol qui peut être différent du climat général et qui joue un rôle essentiel sur la pédogenèse et la végétation (Baize, 2004)

5.1. Facteurs pédoclimatiques influençant la croissance des plantes

Les principaux facteurs pédoclimatiques qui influencent la croissance et le développement des plantes aromatiques et médicinales sont la température, pluviométrie disponibilité en eau, vent, luminosité, rayonnement, drainage du sol, texture du sol et la teneur en nutriments du sol. (Gray et al, 2016 ; Dusenge et al., 2019).

Ces facteurs climatiques et pédologiques agissent de manière complexe et interdépendante pour affecter la croissance, le développement et la production des plantes aromatiques et médicinales. Un équilibre optimal de ces différents facteurs est essentiel pour une culture réussie. (Gautreau, 1973).

5.2. Effets des facteurs pédoclimatiques sur les huiles essentielles

Les climats et les sols ont une influence significative sur la composition des huiles essentielles des plantes aromatiques. Le climat, comprenant des facteurs tels que la température, la pluviométrie, la luminosité et les conditions météorologiques, ainsi que le sol, incluant le drainage, la texture et la teneur en nutriments, jouent un rôle crucial dans la formation des huiles essentielles. Par exemple la composition du sol influence les HE dans :

-La transformation des composés : La composition du sol, notamment sa teneur en nutriments, peut affecter les transformations biochimiques au sein de la plante. Par exemple, la transformation du p-cymène en thymol dans l'huile essentielle de thym est influencée par les conditions du sol.

-La variabilité de la composition : Même pour des plantes de la même espèce, la composition de leurs huiles essentielles peut varier en fonction du sol dans lequel elles poussent. On parle alors de "chénotypes" différents, reflétant les spécificités du terroir.

- Les propriétés des huiles essentielles : Les caractéristiques du sol, comme sa texture, son drainage et sa teneur en nutriments, peuvent influencer les propriétés biochimiques et thérapeutiques des huiles essentielles produites par les plantes.

5.3. L'influence des facteurs pédoclimatiques sur le genre Thymus

L'écologie du genre *Thymus* est marquée par le fait que les thyms sont des plantes héliophiles qui apprécient le soleil. Il est essentiel que les sols soient bien drainés car les plantes vivent souvent sur des rochers ou des pierres. Cependant, les diverses espèces de *Thymus* ont besoin de substrats très variés, comme *Thymus Carnosus* qui vit sur des dunes de sable près de la mer, *Thymus Lacaitae* qui vit sur des sols gypseux, et *Thymus Vulgaris* qui vit généralement sur des sols calcaires.

Les thyms sont des plantes extrêmement robustes qui peuvent survivre à des conditions climatiques extrêmes en ce qui concerne la température et l'alimentation en eau. Ni le froid ni l'aridité ne les effrayent. Certains types de poils sont denses et tomenteux et leurs feuilles sont aciculaires, ce qui leur permet de faire face à des conditions extrêmement

sèches. La production élevée d'huiles essentielles peut également être une caractéristique d'adaptation au climat sec, car les composés volatils s'évaporent et créent une atmosphère saturée autour de la plante, ce qui rend la perte d'eau plus difficile.

Dans la section Serpyllum, certaines espèces peuvent être présentes dans des climats extrêmement froids, telles que *Thymus Glacialis* en Sibérie ou *Thymus Praecox* au Groenland. En termes d'écologie, on peut observer la corrélation suivante : les plantes buissonnantes, ligneuses et érigées sont très répandues dans les climats secs, alors que dans les climats tempérés, elles sont plus faciles à trouver dans les climats secs, tandis que dans les climats plus frais et humides, ce sont généralement des plantes à feuilles plates et ligneuses uniquement au niveau de la tête qui sont plus fréquentes. En général, ces dernières sont herbacées et présentent des tiges rampantes ou couchées (Stahl-Biskup *et al.*, 2002)

5.4. Impact des variations pédoclimatiques sur le rendement et la qualité des huiles essentielles de Thymus

Les facteurs environnementaux ont eu un impact sur les rendements et les compositions en huile essentielle. Parmi ces facteurs, le pH du sol et la latitude ont été les plus importants. Ils ont observé que le climat, la génétique, les conditions du sol, le stade de croissance (végétatif ou floraison), l'organogenèse et le moment de la récolte ont un impact sur le rendement et la qualité de l'huile essentielle (Gudaitytė *et al.*, 2007), L'hypothèse a été avancée que l'écart entre les HE des écotypes était causé par les disparités géographiques et climatiques (Saeidi *et al.*, 2018).

Les recherches menées par (Özguven et Tansi 1998) et (Pirbalouti *et al.*, 2011) ont démontré que l'altitude jouait un rôle essentiel dans l'impact des caractéristiques physiologiques et chimiques des espèces de *Thymus* et de *Thymus Daenensis Celak*.

5.5. Modélisation des effets pédoclimatiques sur les plantes.

Selon Coquillard et Hill (1997), un modèle peut se définir comme une représentation simplifiée et idéaliste de la réalité, construite sur la base d'un ensemble ordonné d'hypothèses relatives à un phénomène observable et mesurable, et ayant pour but de reproduire au mieux le comportement du système réel étudié, en fonction de la problématique posée et des objectifs des modélisateurs.

La modélisation des effets pédoclimatiques sur les plantes nécessite d'intégrer les processus physiologiques de la plante, son architecture, ainsi que les interactions avec les facteurs environnementaux comme la température, l'eau et les nutriments du sol. Ces modèles de croissance des plantes peuvent être classés en deux grandes catégories : les PBMs (plant-based models) et les FSPMs (functional-structural plant models). Les PBMs simulent les processus physiologiques de la plante en fonction de facteurs comme le rayonnement intercepté, la température, les nutriments et l'eau. Les FSPMs décrivent explicitement le développement architectural de la plante et son interaction avec les processus physiologiques, C'est à dire que ces modèles doivent prendre en compte les interactions entre la plante et son environnement pédoclimatique (Coquillard *et al.*, 1997)

6. Les techniques d'extraction des huiles essentielles

Le choix des méthodes d'extraction des HEs revêt une importance cruciale en raison de la diversité et de la complexité chimique de ces dernières. Il est essentiel d'opter pour une technique d'extraction non sélective en termes de polarité et qui prévient les altérations biochimiques telles que la dégradation thermique, l'oxydation, la réduction, l'hydrolyse, les variations de pH, ou la perte de composés volatils. Ainsi, une attention particulière doit être portée aux paramètres d'extraction et aux propriétés physico-chimiques des HEs pour garantir l'intégrité et la représentativité de l'extrait final. Des méthodes telles que la distillation à la vapeur, l'extraction par solvant, ou les techniques d'extraction assistée par ultrasons sont couramment évaluées pour leur efficacité et leur sélectivité, en tenant compte des caractéristiques spécifiques des HEs ciblées (Lucchesi *et al.*, 2004 ; Périno-Issartier *et al.*, 2011).

6.1. La distillation

La plupart des composants odorants contenus dans les végétaux sont entraînés à la vapeur d'eau. Le flux de vapeur d'eau et des composés organiques volatils sont entraînés par distillation azéotropique, et, après condensation par refroidissement dans un réfrigérant, se séparent par différence de densité. L'HE, la plupart du temps plus légère que l'eau, surnage et peut être récupérée dans des séparateurs, dont le fameux « vase florentin ». On distingue deux types de distillation des plantes (Monin, 2012) :

6.1.1. Hydrodistillation : le végétal est immergé dans l'eau portée à ébullition (**Figure 2**)

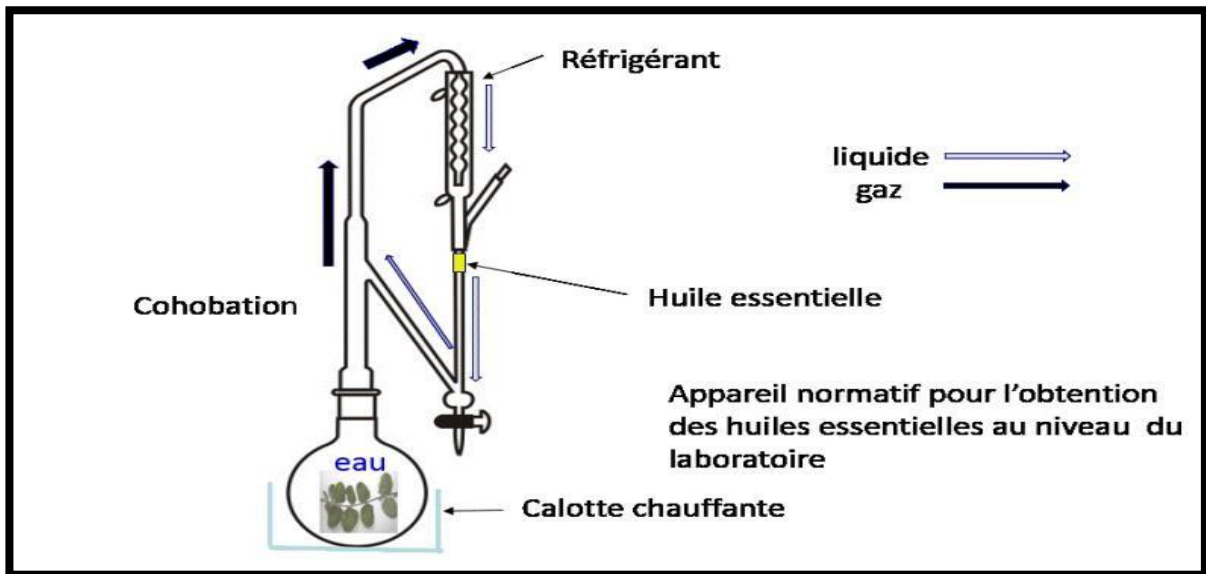


Figure 2 : Schéma d'un appareil de type Clevenger (**Garcia, 2017**)

6.1.2. Entraînement à la vapeur, où seule la vapeur d'eau traverse la masse végétale, avec deux variantes selon que la vapeur est humide ou sèche (**Figure 8**).

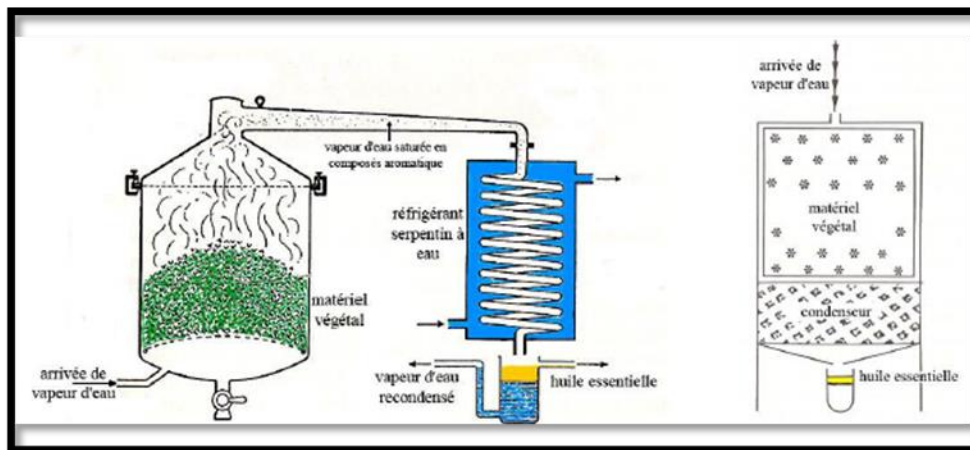


Figure 3 : Principe d'entraînement à la vapeur d'eau et d'hydrodiffusion (**Lucchesi, 2005**).

6.2. Expression à froid

Les essences de citrus (orange, citron, limette, bergamote, pamplemousse, cédrat...) ne sont pas obtenues comme précédemment par hydrodistillation ou entraînement à la vapeur d'eau des alambics, mais par expression à froid du péricarpe des fruits, qui fait éclater les cellules et libère l'HE qui se trouve dans la peau ou zeste (**Monin, 2012**). Les appareils utilisés sont des machines en continu qui grattent (pellatrices italiennes) et pressent (fumatrices italiennes).

6.3. L'extraction par solvants volatils des extraits aromatiques

La technique d'extraction « classique » par solvant, consiste à placer dans un extracteur un solvant volatil et la matière végétale à traiter. Grâce à des lavages successifs, le solvant va se charger en molécules aromatiques, avant d'être envoyé au concentrateur pour y être distillé à pression atmosphérique. Le produit ainsi obtenu est appelé « concrète ». Cette concrète pourra être par la suite brassée avec de l'alcool absolu, filtrée et glacée pour en extraire les cires végétales. Après une dernière concentration, on obtient une « absolue ». Les rendements sont généralement plus importants par rapport à la distillation et cette technique évite l'action hydrolysant de l'eau ou de la vapeur d'eau. Du fait de l'utilisation de solvants organiques, cette technique présente toutefois des inconvénients qu'il est important de noter. En effet, l'intervention de solvants organiques peut entraîner des risques d'artéfacts et des possibilités de contamination de l'échantillon par des impuretés parfois difficile à éliminer. Le choix du solvant d'extraction va s'avérer très délicat, d'autant que la législation sur les produits à destination de l'industrie agro-alimentaire est extrêmement rigoureuse. Le solvant choisi, en plus d'être autorisé devra posséder une certaine stabilité face à la chaleur, la lumière ou l'oxygène, sa température d'ébullition sera de préférence basse afin de faciliter son élimination, et il ne devra pas réagir chimiquement avec l'extrait. Parmi les solvants les plus utilisés, on recense : le méthanol, l'éthanol, l'éther de pétrole ou encore le dichlorométhane. Cependant, depuis quelques décennies, l'extraction par solvant a connu d'intéressantes améliorations. L'hydrodistillation-extraction simultanée et l'extraction par Soxhlet en sont les principales (Figure 4) (Bousbia, 2011).

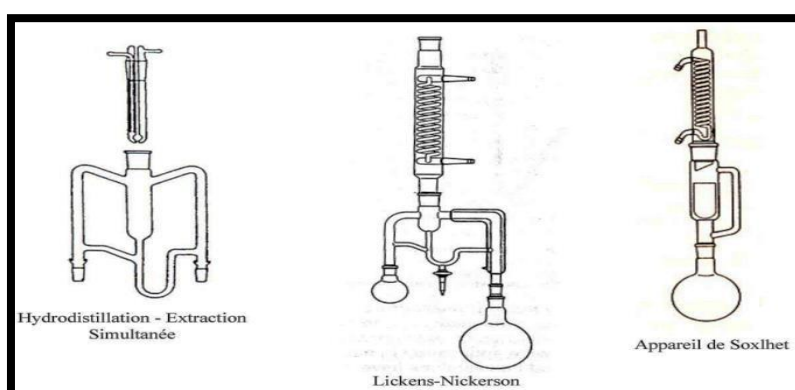


Figure 4: Dispositifs d'extraction par solvants volatiles (Bousbia, 2011)

6.4. L'extraction par CO₂ subcritique (CS-CO₂)

Développé dans les années 80, cette technologie devient aujourd'hui la plus prometteuse des techniques d'extraction. Elle donne en général des extraits de qualité différente de ceux obtenus par les autres techniques. C'est un cas particulier de l'extraction par solvant avec la différence qu'ici le solvant est un gaz liquéfié, évaporé ensuite par simple décompression. Le plus utilisé étant le CO₂ à l'état supercritique ($T_c = 31^\circ\text{C}$, $P_c = 73,8$ bars). Celui-ci présente l'avantage d'être un fluide ininflammable, non explosif, non toxique, non corrosif, inodore et inerte. Le fait d'opérer à une température faible critique du CO₂ ($31,1^\circ\text{C}$) permet d'extraire et sauvegarder les composants fragiles des HEs (lilas, muguet, etc.). Ce procédé est largement utilisé en industrie pharmaceutique permettant l'extraction des composés actifs (**Santoyo et al., 2014**).

L'utilisation de l'extraction par CO₂ supercritique permet d'éviter la dégradation thermique et la décomposition des composés labiles du fait que l'opération est effectuée à une basse température, tandis que l'absence de la lumière et de l'oxygène empêche les réactions d'oxydation (**Diaaz-Reinoso et al., 2006**). L'efficacité de la technique d'extraction SC-CO₂ est associée à plusieurs paramètres, notamment la température, la pression, le flux de CO₂ supercritique, la présence de co-solvant et le temps d'extraction (**Diaaz-Reinoso et al., 2006**).

L'extraction par SC-CO₂ est adaptée pour extraire des huiles et des composés lipophiles, mais de nombreux composés phénoliques naturels sont peu solubles dans ce solvant (**Pereira & Meireles, 2010**). La présence de co-solvant permet alors d'améliorer le rendement d'extraction par augmentation de la solubilité. Le type de co-solvant utilisé est déterminé en tenant compte de l'affinité entre le co-solvant et les composés cibles (**Pereira & Meireles, 2010**). Les co-solvants les plus fréquemment utilisés sont le méthanol et l'éthanol qui induisent des interactions dipôle/dipôle et à former une liaison hydrogène avec des groupes fonctionnels polaires. Le matériel végétal est mis dans un récipient cylindrique à extrémités poreuses. Celui-ci est ensuite placé à l'intérieur d'un extracteur thermostatiquement contrôlé. Le fluide supercritique est distribué par l'extracteur, dissolvant les composés organiques du matériel à l'intérieur du récipient. Plus tard la pression est en partie libérée dans le séparateur B, qui convertit le fluide supercritique en phase gazeuse. Les composés organiques dissous sont séparés du gaz qui est alors liquéfié dans le condensateur C, en diminuant la température (**Figure 5**) (**De Castro et al., 1999 ; Starmans & Nijhuis, 1996 ; Nakatsu et al., 2000**).

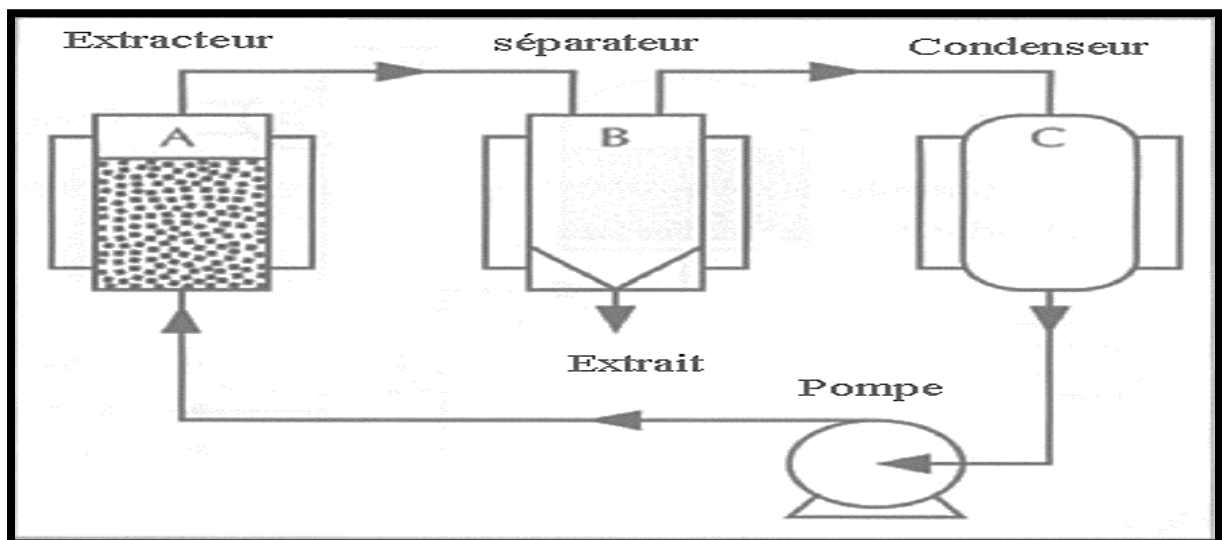


Figure 5 : Une représentation simplifiée d'une installation d'extraction au CO₂ supercritique (**Starmans & Nijhuis, 1996**)

Outre les méthodes traditionnelles, les avancées technologiques récentes ont conduit à l'élaboration de techniques d'extraction d'huiles essentielles novatrices. Ces procédés innovants se distinguent par leur capacité à optimiser l'efficacité et à augmenter les rendements tout en minimisant leur impact environnemental. Des méthodes telles que l'extraction par fluide supercritique, la distillation par micro-ondes, l'extraction assistée par ultrasons, l'extraction par solvant sous pression ambiante et l'hydrodistillation sous vide sont à la pointe de ces avancées,

offrant des alternatives plus vertes et plus durables pour l'obtention d'huiles essentielles de haute qualité. Ces techniques révolutionnent l'industrie en réduisant la consommation d'énergie et en éliminant l'utilisation de solvants chimiques.

7. Techniques d'analyse des composants des huiles essentielles

Selon la Pharmacopée française et européenne, le contrôle des huiles essentielles s'effectue par différents essais, comme la miscibilité à l'éthanol et certaines mesures physiques : indice de réfraction, pouvoir rotatoire et densité relative. La couleur et l'odeur sont aussi des paramètres importants (Pibiri, 2006).

7.1. Chromatographie en phase gazeuse (CPG)

La chromatographie est une puissante technique de séparation qui trouve de nombreuses applications dans tous les domaines de la science. (Skoog *et al.*, 2003). La CPG s'est montrée une méthode appropriée pour la séparation et l'identification des composants d'une HE, elle réalise à la fois une analyse qualitative et quantitative (Paris et Godon, 1979). En CPG, l'échantillon est vaporisé et injecté en tête de colonne. L'élution est assurée par un flux de gaz inerte qui sert de phase mobile. La CPG est basée sur le partage de l'analyte entre une phase gazeuse mobile et une phase (liquide ou solide) immobilisée sur la surface d'un support inerte (Skoog *et al.*, 2003). Les constituants des mélanges appelés généralement « solutés » sont inégalement retenus par la phase stationnaire lors du transit dans la colonne. De ce phénomène appelé « rétention », les solutés injectés se déplacent avec une vitesse inégale entre eux et inférieure à celle de la phase mobile, ceci les conduit à sortir de la colonne les uns après les autres. On enregistre d'abord un signal dit ligne de base en présence du gaz vecteur seul, puis un pic au passage de chaque soluté séparé (Tranchant *et al.*, 1995).

7.2. Spectrométrie de masse (SM)

Selon Skoog *et al.*, (2003), la spectrométrie de masse est sans doute, parmi toutes les techniques analytiques, celle dont le domaine d'application est le plus étendu. En effet, elle peut fournir des informations concernant la composition élémentaire d'un échantillon ; la structure de molécules inorganiques, organiques et biologiques ; la composition qualitative et quantitative de mélanges complexes, ... etc.

Vu sa capacité à identifier un très grand nombre de composés présents dans le mélange à analyser, elle représente le couplage le plus utilisé dans divers secteurs notamment avec la chromatographie phase gazeuse (**Tranchant, 1982 ; Rouessac et Rouessac, 1995**).

7.3. Le couplage CG/SM

La complexité des mélanges à analyser dans des domaines très différents a conduit au développement de techniques de plus en plus sélectives pour permettre la caractérisation de composés souvent présents à l'état de traces. Au cours des vingt dernières années, les avancées obtenues dans ces domaines d'analyse tiennent principalement à deux raisons : dans le domaine de la séparation chromatographique et, en particulier, de la CPG, au développement de colonnes chromatographiques capillaires à très haute résolution ; dans le domaine de la détection, au développement en routine des techniques de couplages, de séparations chromatographiques avec la détection par SM. La totale maîtrise du couplage chromatographique avec la spectrométrie de masse depuis le début des années 80 et la mise au point de spectromètres de masse tandems commerciaux a permis l'utilisation des propriétés de sélectivité de ces deux techniques pour pousser plus en avant les potentialités analytiques attendues de la combinaison de celles-ci, laissant au couplage CG-SM toute la latitude pour affirmer sa sélectivité pour l'analyse de mélanges complexes (**AFNOR, 2000**).

Lorsqu'on soumet un composé moléculaire à cette analyse, on déclenche un processus à plusieurs étages (**Pradeau et Cohen, 1992**) :

-Ionisation : les molécules présentes dans l'échantillon se volatilisent sous l'effet du vide et de la haute température (200°C), il en résulte un mélange d'ions issus de la fragmentation de départ.

-Accélération : les ions formés se dirigent vers le dispositif de séparation sous l'effet d'un champ magnétique augmentant ainsi leurs énergies cinétiques.

-Séparation : les ions seront distribués suivant leur rapport masse / charge.

-Détection : après séparation, les ions sont recueillis par un détecteur sensible aux charges électriques transportées.

- Traitement du signal : le signal de sortie de l'appareil conduit au spectre de masse qui constitue la représentation conventionnelle de l'abondance des ions en fonction de leurs rapports : masse / charge.

7.4. L'appareillage CG/SM permet de fournir un chromatogramme accompagné d'un ensemble de spectres de masse correspondants à chaque pic chromatographique, ce qui permet l'identification précise de la majorité des constituants séparés par la CPG.

8. Évaluation des propriétés physico-chimiques des huiles essentielles

D'après **de la Charie (2019)**, auteur du livre "Se soigner par les huiles essentielles", : Les méthodes utilisées pour déterminer les indices physico-chimiques sont celles indiquées par le recueil de normes de l'Association Française de Normalisation (**AFNOR**).

8.1. Analyse organoleptique

La première analyse, celle qui demande le moins de matériel, mais qui est pourtant la plus complexe à réaliser de manière adéquate en raison de sa grande subjectivité : l'analyse organoleptique. L'organoleptique est un terme étendu qui désigne l'analyse sensorielle : en résumé, l'odeur, la couleur, le goût, le toucher.

8.2. Mesure de la densité

La densité peut être considérée comme le rapport entre le volume et la masse d'une matière (en tenant compte de la température de référence utilisée pour l'eau). On peut mesurer cette mesure en utilisant un pycnomètre (solides ou liquides), une balance hydrostatique (solides), un aréomètre (liquides) ou encore un densimètre digital équipé d'un capteur à tube oscillant (liquides et gaz). Le pycnomètre est l'instrument le plus versatile, car sa méthode de mesure est adaptée aux liquides et aux solides.

8.3. Indice d'acide / Acidité libre

Selon la Pharmacopée Européenne, l'indice d'acide correspond à la quantité d'hydroxyde de potassium (KOH) nécessaire pour neutraliser les acides libres présents dans 1g de substance en milligrammes. Il est donc exprimé en mg KOH/g. L'indice d'acide exprime la transformation des huiles essentielles par hydrolyse (réaction avec l'eau, l'humidité de l'air). Lorsqu'une huile essentielle subit une hydrolyse, c'est sa composition qui est affectée, car il s'agit d'une réaction.

8.4. Indice de peroxyde

La plupart des huiles essentielles ont tendance à s'oxyder pendant leur vieillissement. L'oxygène est absorbé par les composés les plus sensibles de l'huile qui se transforment progressivement en d'autres composés comme les peroxydes, très réactifs et très sensibilisants (ils transmettent aisément leur état d'oxydation et induisent une hypersensibilité par exposition répétée).

Évidemment, veiller à la protection des huiles essentielles contre l'oxygène (de l'air), la lumière et les températures élevées permet de ralentir considérablement le processus d'oxydation, mais en réalité, il est impossible de le stopper entièrement. Cependant, dans la plupart des cas, l'indice de peroxyde rend néanmoins compte de l'état d'oxydation des huiles essentielles (et donc de leur sensibilité), information qui n'est pas accessible uniquement avec le profil chromatographique.

8.5. Indice de réfraction

Quand la lumière pénètre dans un nouvel environnement, une partie de celle-ci s'y répand, mais en le déviant. Ce phénomène est une réfraction. La déviation entre l'air et le liquide à caractériser est mesurée par l'indice de réfraction. Il est mesuré à l'aide d'un réfractomètre et s'écrit comme suit : $\sin(i)/\sin(r)$, Cette 'indice est utilisé pour mesurer la déviation entre l'air et le liquide à caractériser. On le mesure avec un réfractomètre et il est écrit de la manière suivante : $\sin(i)/\sin(r)$,

Les huiles essentielles et autres liquides sont identifiés et contrôlés par l'indice de réfraction, un critère de pureté. Toutes les substances ont un indice de réfraction particulier. La pureté d'un produit est élevée lorsque son indice de réfraction est proche de la valeur attendue. Il est important de souligner que cet indicateur est influencé par la température du liquide (elle doit être maintenue à une température de $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$ pour une mesure fiable).

8.6. Miscibilité à l'éthanol

La miscibilité est le fait que deux liquides peuvent se mélanger de manière homogène, c'est-à-dire qu'ils sont composés d'une seule phase. Selon leur composition, les huiles essentielles peuvent être plus ou moins solubles dans l'éthanol. Ainsi, il est possible de mesurer la miscibilité d'une huile essentielle afin de la décrire.

8.7. Pouvoir rotatoire

Cette mesure physico-chimique permet de déterminer la nature d'un liquide contenant des molécules chirales, en particulier les huiles essentielles qui renferment pour certaines des substances chirales et donc ont une activité optique.

L'activité optique (ou pouvoir rotatoire) désigne la capacité des substances chirales à faire tourner le plan de polarisation de la lumière polarisée de manière rectiligne. C'est ainsi que les filtres polarisants sont fabriqués. Dans le domaine des huiles essentielles, le limonène est une molécule chirale (c'est-à-dire qu'il ne peut pas être superposé à son image dans un miroir plan, comme le sont nos mains), ce qui signifie qu'il a deux énantiomères (2 configurations dans l'espace de la même entité)

Chapitre II : Matériel et méthodes

1. Matériel végétal

1.1 Description botanique

La plante est buissonnante (arbrisseau), 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, aigues, 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 6**). (Goetz P et Ghedira K , 2012)



Figure 6 : Photographie des trois morphotypes de Thym étudié
(A-Chellata, B-Tala Guilef, C-Ait Ouabane)

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 1 : 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	<i>Thymus</i> 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 entre Bejaia et Tizi-Ouzou en Juillet 2023 (**Tableau 2**).

Tableau 2 : Caractéristiques des sites de récolte

Station	Longitude	Latitude	Altitude
Chellata	E 4°.45888	N 36°.51694	1345 m
Tala-Guellef	E 3°.98333	N 36°.48944	998 m
Ait Ouaabane	E 4°.30500	N 36°.47861	1100 m

Les échantillons ont été séchés à l'ombre, dans une chambre aérée, et à température ambiante. Coupées grossièrement pour l'opération d'extraction des HEs.

2.2. Extraction des huiles essentielles (hydrodistillation)

Une hydrodistillation (**Figure 7**) est assurée grâce à un appareil de type Clevenger, où 100 g de matière végétale sont introduits avec une quantité suffisante d'eau distillée dans un ballon de 2 L. Après installation et fermeture du montage, la mise en marche du chauffe ballon est effectuée avec un réglage optimum du chauffage pour permettre une stabilité de l'extraction à une vitesse constante et bien maîtrisée.

La vapeur chargée d'huile essentielle arrive dans le condenseur. La durée totale de l'extraction est estimée à 3 h (jusqu'à ce qu'on obtienne plus d'HE). L'huile essentielle se distingue de l'hydrolat (eau aromatique) par sa différence de densité et de couleur. On la sépare de celui-ci par décantation. Elle est ensuite séchée par du sulfate de sodium anhydre (Na_2SO_4) puis récupérée et conservée dans des flacons de couleur brune, hermétiquement fermés et stockés dans un endroit frais (4°C) à l'abri de la lumière.

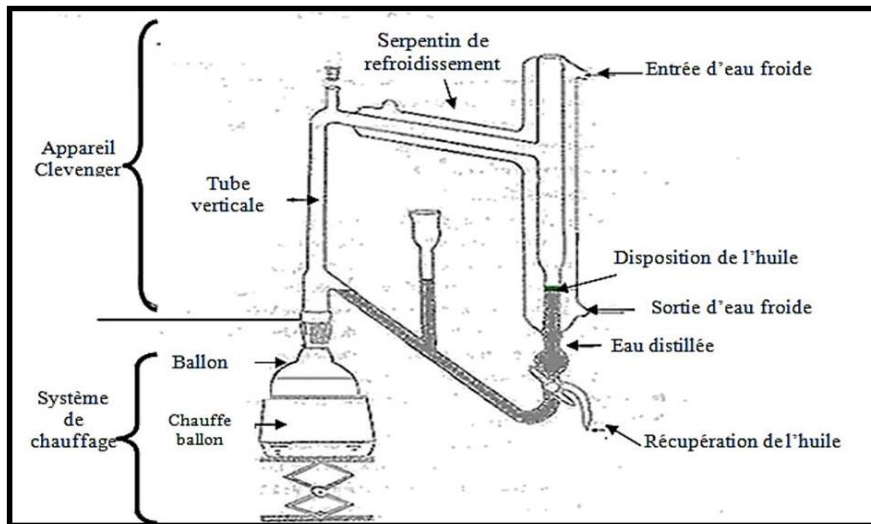


Figure 7 : Dessin schématique d'hydrodistillateur de type *Clevenger*.

3. Propriétés physico-chimiques

Des évaluations physico-chimiques ont été réalisées pour les huiles essentielles extraites par hydrodistillation, et qui ont porté sur : la détermination du rendement, analyse organoleptique, la densité, indice de réfraction, indice d'acide, indice de saponification, indice d'iode, pouvoir rotatoire et l'indice de réfraction.

3.1. Détermination du rendement

Le rendement en huile essentielle est le rapport entre le poids de l'huile essentielle extraite et le poids de la matière végétale sèche traitée (**Carre, 1953**).

Le rendement est exprimé en pourcentage (%) et calculé par la formule suivante :

$$\mathbf{RHE\% = 100 PHE / PMVS}$$

Avec :

RHE% : rendements des HEs en pourcentage.

PHE : poids des HEs

PMVS : poids de la matière végétale sèche

3.2. Analyse organoleptique

La caractérisation organoleptique d'une HE se porte sur son aspect sa couleur et son odeur.

3.3. La densité

La densité ou densité relative d'une substance ou huile essentielle est le rapport entre la masse d'un volume donné de cette substance et la masse d'un volume égal d'eau distillée à une température de 20°C et mesuré à l'aide d'un Pycnomètre (Figure 8). Cet indice est déterminé selon les indications de la norme AFNOR, NF-T 75- 111.

La densité est calculée par la formule suivante :

$$\mathbf{d^{20}_{20}=(m_2-m_0)/(m_1-m_0)}$$

avec :

m₀ : la masse du pycnomètre vide

m₁ : la masse du pycnomètre +eau distillée

m₂ : la masse du pycnomètre + huile essentielle



Figure 8 : photographie d'un pycnomètre

3.4. Indice de réfraction

Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un réfractomètre d'Abbe (**Figure 9**). On place une goutte de chaque huile essentielle sur le prisme de réfractomètre, on attend la température se stabilise et on effectue le mesurage.

La détermination est effectuée à une température différente de 20°C. l'indice est calculé par le biais de la formule suivante :

$$n = n' + 0,0004 (t' - 20)$$

Avec :

n' : indice de réfraction observé

n : indice de réfraction calculé

t' : température ambiante



Figure 9 : 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 10). 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 :

$$[\alpha]_D^{20} = \frac{\alpha}{l \cdot c}$$

Avec :

$[\alpha]^{20}_D$: pouvoir rotatoire spécifique

α : pouvoir rotatoire de la solution en degrés (°)

l : la longueur de la cuve en décimètre (dm)

c : la concentration de la solution en gramme par millilitre ($\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)



Figure (10) : Photographie d'un 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 :

$$I_a = 56,11 \times V \times C / m$$

Avec :

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

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 phénophtaléine, 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 :

$$I_e = (28,05/m) * (V_0 - V_1) - I_a$$

Avec :

I_e : indice d'ester

m : masse en gramme de la prise d'essai

V₀ : volume en ml de la solution de HCL mesuré pour l'essai à blanc

V₁ : volume en mm de la solution d'HCL mesuré pour le calcul de I_e

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 Na₂S₂O₃(0.01 N).

Cet indice est calculé par la formule suivante :

$$I_p = (V_0 - V_1) / P * 10 \text{ (mécq. O}_2 \text{ /kg d'H.E)}$$

Avec :

I_p : indice de peroxyde

V₀ : volume de la solution de thiosulfate de sodium utilisé pour l'essai à blanc

V₁ : volume de la solution de thiosulfate de sodium utilisé pour l'essai

P : prise d'essai e gramme

3.10. Indice de saponification

L'indice de saponification (**I_s**) est le nombre en milligrammes de (KOH) nécessaire pour transformer en savon les acide gras et les triglycérides d'un gramme de corps gras.

Pour calculer l'indice de saponification on utilise la formule suivante :

$$I_s = I_e + I_a$$

3.11. 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 partie, 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

L'indice d'iode est calculé par la formule suivante :

$$Ii = N (V_0 - V_1) / m$$

Avec :

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

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 ; Chellata; Ait Ouabane; et Tala Guilef, situés dans les régions de Tizi Ouazou et Béjaia . Ils ont été analysés au niveau de laboratoire pédologie au sein 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 ; mise en conservation dans des flacons couverts.

Ces 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 (méthode Kjeldahl), le dosage du phosphore assimilable (**Joret-Hebert, 1955**), les bases échangeables (Ca²⁺ et Mg²⁺) par complexométrie, le carbone (méthode **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 pipette de Robinson. Cette méthode est basée sur la destruction totale de la matière organique à l'eau oxygénée à 20 volumes, dispersion des agrégats par le pyrophosphate de sodium à 40%, 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. Les fractions grossières de diamètre $>50 \mu\text{m}$ (Sables grossiers, Sables fins, Limons grossiers) sont récupérées par tamisage (**figure 11**) 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 11 : 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 à l'aide d'un pH mètre de paillasse à électrode de verre (Figure 12) 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 12 : Photographie du pH mètre

4.3. Conductivité électrique :

La conductivité électrique a été mesurée à l'aide d'un conductimètre (**Figure 13**) sur une suspension de terre fine dont le rapport sol/eau = 1/5. La CE du sol est exprimée en microsiemens par centimètre ($\mu\text{s/cm}$) (**Baize, 2000**).



Figure 13 : Photographie du conductimètre

4.5. Dosage du calcaire total :

Le calcaire total est déterminé par la méthode gazométrique dont le principe consiste à décomposer les carbonates du sol par l'acide chlorhydrique ($\text{HCl}_{1/2}$) et à mesurer le volume de gaz carbonique (CO_2) dégagé grâce au calcimètre de Bernard (**Soltner, 2005**).

4.6. Dosage du carbone organique :

Le carbone organique est dosé par la méthode Anne modifiée de 1945 (**Figure 14**). 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, 1988**). La matière organique est déterminée par la formule suivante : $\text{MO \%} = \text{C \%} \times 1,72$



Figure 14 : photographie de l'appareillage du dosage du carbone (Anne modifiée)

4.7. 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 15-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 15-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 15 : photographie A-B des appareils de minéralisation et de distillation UDK 142 (VELP).

4.8. 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 d'étalon est réalisé en parallèle et la lecture de la densité optique (DO) est 650 nm est faite à l'aide d'un spectrophotomètre (**Figure 16**). Les teneurs du phosphore du sol sont déterminées à partir d'une courbe standard, puis exprimées en ppm.



Figure 16 : photographie du spectrophotomètre

4.9. 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).

4.10. Dosage du K^+ et Na^+ :

Les teneurs du sol en K^+ et Na^+ ont été mesurées par le photomètre à flamme (Figure 17) à partir du percolât obtenu à l'acétate d'ammonium.



Figure 17 : photographie du photomètre à flamme

5. Les données climatiques

Les informations climatiques telles que les précipitations et les températures minimales, moyennes et maximales ont été collectées pour les trois populations étudiées à partir du site Internet : www.en.climate-data.org. Ensuite, 10 paramètres du climat (variables climatiques et indices bioclimatiques) (Rivas Martinez, 1994) ont été calculés sur une période de 11 ans (2010-2021) à partir des données climatiques extraites en utilisant le logiciel ArcGIS.

Les variables climatiques ainsi que les indices bioclimatiques considérés dans la présente étude sont : la température moyenne annuelle (T en $^{\circ}\text{C}$), la température positive annuelle (T_p), la température négative annuelle (T_n), la température d'été (T_e), les précipitations annuelles (P_a) l'indice de thermicité (I_t), l'indice de continentalité (I_c), l'indice ombrothermique (I_o), l'indice ombrothermique estival ou d'été (I_{ov}),

5.1. Indice de thermicité (I_t)

En se basant sur la température moyenne annuelle (T), la températures moyennes minimale du mois le plus froid (m) et la température moyenne maximal du mois le plus chaud de l'année(M).

Cet indice est calculé par la formule :

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

5.2. Indice de continentalité (Ic)

C'est la différence de la température moyenne du mois le plus chaud de l'année (**Tmax**) et la température moyenne du mois le plus froid de l'année (**Tmin**). Cet indice est calculé par la formule :

$$(Ic) = Tmax - Tmin$$

5.3. Indice ombrothermique (Io)

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

$$(Io) = Pp / Tp$$

5.4. Indice ombrothermique d'été (Iov)

C'est le rapport des précipitations d'été en mm des trois mois consécutifs les plus chauds de l'année (**Ppv**), sur la somme des températures moyenne des mois consécutifs les plus chauds de l'année (**Tpv**). Cet indice est déterminé par la formule :

$$(Iov) = Ppv / Tpv$$

5.5. Température positive annuelle (Tp)

C'est la valeur de la somme des températures moyenne qui sont supérieurs à 0°C.

5.6. Température annuelle négative (Tn)

C'est la valeur qui résulte de la somme des températures moyennes des mois dont la moyenne est inférieure à 0°C.

5.7. Température d'été (Tv)

C'est la valeur de la somme des températures moyennes des mois d'été supérieure à 0°C.

5.8. Précipitation positive (Pp)

C'est les précipitations annuelles en mm des mois dont la température moyenne est supérieure à 0°C.

5.9. Précipitations d'été (Pv)

Valeur en mm résultante de la somme des précipitations moyennes des trois mois d'été.

6. Analyse statistique des données

L'ensemble des résultats obtenus lors des expériences menées a été soumis à un examen statistique d'analyse de variance (ANOVA) à un facteur. Les comparaisons des moyennes ont été effectuées en utilisant le test post-Hoc de Newman-Keuls (SNK). Des régressions linéaires et une analyse en composantes principales (ACP) des résultats pédoclimatiques et des propriétés physico-chimiques des HEs ont été réalisées afin de prédire et d'expliquer les variations qualitatives et quantitatives de ces extraits. Ces analyses ont été réalisées à l'aide du logiciel XL stat 2022 (4.1).

Chapitre III : Résultats et discussion

1. Rendement et caractéristique organoleptique

L'hydro distillation des parties aériennes fleuries des différents morphotypes de l'espèce étudiée a fourni des huiles essentielles ayant des colorations variables allant du jaune clair au jaune-orangé avec de fortes et persistantes odeurs (**Tableau 3**). Les rendements en HEs sont illustrés sur la **Figure 18**.

Tableau 3 : caractéristiques organoleptiques des huiles essentielles du Thym étudié

Huiles essentielles	Aspect	Couleur	Odeur
Chellata	<i>Liquide</i>	<i>Jaune-orange</i>	<i>Forte, odeur de citronnelle</i>
Tala Guilef	<i>Liquide</i>	<i>Jaune claire</i>	<i>Forte- odeur de citronnelle</i>
Ait Ouabane	<i>Liquide</i>	<i>Jaune claire</i>	<i>Forte- odeur de citronnelle</i>

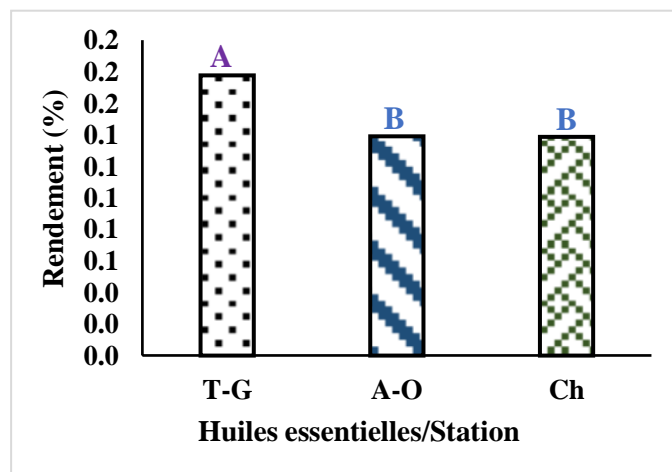


Figure 18 : Rendement en HEs des différents morphotypes de Thym étudié

Les moyennes ne partageant aucune lettre sont significativement différentes ($p \leq 005$)

Les valeurs représentent la moyenne des rendements de trois extractions séparées par morphotype, exprimées en gramme d'huile essentielle par gramme de matériel végétal sec. Par la suite, les rendements ont été soumis à une analyse de variance (ANOVA à un facteur) avec

une comparaison de moyennes par le test de Student Newman-Keuls (SNK) par le logiciel XL STAT V.22 et les différences sont considérées significatives au seuil de $P \leq 0,05$. Par conséquent, selon les résultats obtenus, des différences statistiquement significatives ont été observées en fonction du site de récolte. Les rendements sont répartis en deux groupes :

Le premier groupe se compose des huiles essentielles obtenues à partir du morphotype de Tala Guilef affichant des rendements d'environ (1,77%). Il s'agit des rendements les plus élevés pour cette espèce de thym, avec une différence hautement significative au seuil de 5% selon le test (SNK).

Le second groupe, comparativement au précédent, s'individualise par des rendements légèrement faibles des HES extraites du thym récolté de Chellata (1,38%) et d'Ait Ouabane (1,39 %).

D'après les résultats cités dans la littérature, il est bien établi que le genre *Thymus* est connu pour contenir des huiles essentielles. En comparant les rendements des huiles essentielles obtenus au cours de notre étude avec ceux rapportés par d'autres chercheurs, nous avons fait le constat suivant :

Les résultats de la production quantitative des huiles essentielles des trois morphotypes de thym étudiés sont du même ordre de grandeur que les études rapportées par (**Benbouali, 2006., Aomari & Sehaki, 2018**) sur 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 différences de rendement en huiles essentielles d'un organe à un autre ou d'une espèce à une autre a été rapportées dans la littérature scientifique. L'origine de l'espèce, la période de récolte, l'organe de la plante, la durée de séchage et la méthode d'extraction sont des facteurs parmi d'autres qui peuvent aussi avoir un impact direct sur les rendements en huile essentielle (**Vekiari et al., 2002 ; Karousou et al., 2005 ; Kouamé, 2012 ; Singh et al., 2012**). D'autres facteurs tels que les traitements auxquels on peut procéder avant ou pendant l'hydrodistillation (broyage, dilacération, dégradation chimique ou enzymatique, pression, agitation) contribuent à la variation du rendement et de la qualité de l'huile essentielle (**Morin et al., 1985**).

2. Propriétés physicochimiques des huiles essentielles

Conformément aux directives de l'AFSSAPS, aux pharmacopées européennes, ainsi qu'aux normes ISO et AFNOR, les contrôles physicochimiques des huiles essentielles sont indispensables pour évaluer leur qualité. Ces contrôles sont nécessaires non seulement pour des raisons de sécurité lors du transport et du stockage, mais aussi pour la protection des consommateurs et pour garantir l'intégrité des transactions commerciales. La qualité des huiles essentielles est évaluée à travers une série d'analyses physiques et organoleptiques telles que la couleur, l'odeur, le goût, la viscosité, la densité, l'indice de réfraction, le pouvoir rotatoire, le point d'éclair, etc., des analyses chimiques (comme l'indice d'acide, l'indice d'ester, l'indice de saponification, l'indice de carbonyle, l'indice de peroxyde et certains dosages spécifiques) ainsi que des caractéristiques chromatographiques et spectroscopiques (**Fernandez, X et al., 2012., Kaloustian et Hadji-Minaglou, 2012).**

Les résultats des caractéristiques physicochimiques étudiées sont regroupés dans le **Tableau 4** ci-après.

Tableau 4 : Propriétés physicochimiques des huiles essentielles des trois morphotypes de thym étudiés

HEs/Station	Densité	Indice d'acide	Indice d'iode	Indice de peroxyde	Indice d'ester	Indice de saponification
Thym-Chellata	0,891 ± 0,074 ^A	6,035 ± 0,885 ^A	7,12 ± 0,68 ^B	-	7469,74± 78,73 ^A	7474,29 ± 78,13 ^A
Thym-Tala Guilef	0,811 ± 0,014 ^A	3,625 ± 0,355 ^B	9,25 ± 0,13 ^A	-	7485,56± 8,14 ^A	7488,82 ± 8,87 ^A
Thym-Ait Ouaabane	0,869 ± 0,028 ^A	3,215 ± 0,175 ^B	9,72 ± 0,51 ^A	-	7318,60± 203,52 ^A	7728,47 ± 203,74 ^A

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

L'examen du tableau ci-dessus, montre que les caractéristiques physicochimiques avoisinent dans l'ensemble les normes de commercialisation des huiles essentielles. Elles varient suivant la station de récolte. La densité relative se situe entre 0,891 pour le Thym récolté au niveau de Chellata et 0,869 pour celui d'Ait Ouabane. Tandis que le Thym de Tala Guilef a produit des HEs dont la densité relative est de 0,811. Les indices de réfraction sont très rapprochés et varient entre 1,474 et 1.496 pour le morphotype d'Ait Ouaabane et ceux de Tala

Guilef et de Chellata, respectivement. Ces valeurs sont conformes aux autres huiles rapportées dans la littérature scientifique (**Benbouali, 2006 ; Yaich et Ghalem, 2021**). Pour certains auteurs, l'indice de réfraction d'une huile essentielle varie essentiellement avec la teneur en monoterpènes et en dérivés oxygénés et une forte teneur en monoterpènes donnera un indice élevé et lui confère une réfraction élevée de la lumière (**Kanko et al, 2004 ; Boukhatem et al., 2010 ; Bourkhiss et al, 2015**). Quant aux valeurs du pouvoir rotatoire, les HEs analysées dévient la lumière polarisée et présentent des valeurs positives allant de + 4, 25 à + 4,35 montrant ainsi qu'elles sont dextrogyres.

Les contrôles physicochimiques des huiles essentielles sont indispensables pour évaluer leur qualité. Ces contrôles sont nécessaires non seulement pour des raisons de sécurité lors du transport et du stockage, mais aussi pour la protection des consommateurs et pour garantir l'intégrité des transactions commerciales. Comme le montre le tableau 4, ces analyses regroupent certains indices qualitatifs tels que l'indice d'acide, l'indice d'ester, l'indice de saponification, l'indice d'iode et l'indice de peroxyde. D'autres aussi sont d'usage et témoignent de la qualité des HEs tels que l'indice de carbonyle, l'indice de phénol, certains dosages spécifiques et des caractéristiques chromatographiques et spectroscopiques. (**Fernandez et al., 2012 ; Kaloustian et Hadji-Minaglou, 2012**).

L'indice d'acide est élevé pour tous les HEs analysées (3,215-6,035) ce qui pourrait être attribué soit à la présence d'acides libres, soit à une hydrolyse des esters (**Kanko et al, 2004; Kaloustian et Hadji-Minaglou, 2012**) lors de la conservation à 4 °C. En revanche, l'indice de peroxyde, est indéterminé pour les HEs extraites du Thym récolté des trois stations , ce qui pourrait s'expliquer par le fait que ces HEs ne sont pas exposés à l'air ou à l'oxydation lors de leur conservation. Le Codex Alimentarius, un ensemble de normes internationalement reconnues relatives aux aliments, à la production alimentaire et à la sécurité alimentaire, suggère un indice de peroxyde maximal de 10 milliéquivalents de peroxyde par kilogramme d'huile (10 mEqO₂/Kg) pour les huiles vierges ou pressées à froid (**Kabouré et al., 2022**). Toutefois, cette valeur n'est pas spécifique aux huiles essentielles et peut varier en fonction du type d'huile et de l'usage auquel elle est destinée. Cet indice est un indicateur de degré d'oxydation et d'altération des huiles essentielles (**Fernandez et al., 2012 ; Kaloustian et Hadji-Minaglou, 2012**).

Pour les autres indices mesurés, les HEs analysées présentent des valeurs très élevées, notamment celles des indices d'ester et de saponification ; supérieurs aux normes AFNOR pour

les HEs. En effet, les huiles essentielles de très bonne qualité renferment une très grande quantité d'esters indiquant que l'huile n'a pas subi une dégradation oxydative avant son analyse. Les valeurs élevées de l'indice de saponification enregistrées pour les HEs étudiées renseignent sur la longueur de la chaîne carbonée des acides constituant ces corps gras. L'indice de saponification d'un corps gras est d'autant plus élevé que la chaîne carbonée des acides gras est courte (**Lion, 1955**). Au contrario, l'indice d'iode est lié à l'état d'insaturation des chaînes carbonées dans les corps gras. Les HEs étudiées montrent des valeurs allant de 7,123 à 9,25, conformément aux normes AFNOR pour les HEs.

3. Analyse des paramètres des sols

L'analyse de sol permet d'évaluer d'une part, les caractéristiques physiques pour connaître la capacité du sol à mobiliser et à fournir des éléments minéraux pour le développement de la plante. D'autre part, elle permet d'évaluer la composition chimique de la terre exploitée, c'est-à-dire la teneur en éléments minéraux fertilisants de la terre (**Combeau, A., et al., 1970**)

Les propriétés physiques du sol sont la résultante de la nature et de la proportion des divers constituants, en d'autres termes de la texture ; de l'agencement spatial de ces divers constituants, donc de la structure ; de la quantité et de l'état de l'eau occupant en partie ou en totalité les vides existants entre les unités structurales du sol.

Le tableau 5 illustre les résultats des propriétés physiques des sols analysés et sur lesquels les morphotypes de Thym étudiés ont poussé. Les valeurs enregistrées ont été soumises à une analyse de variance (ANOVA à un facteur) avec une comparaison de moyennes par le test de Student Newman-Keuls (SNK) par le logiciel XL STAT V.22

Tableau 5: Propriétés physiques des sols étudiés

Paramètres Stations	Sables (%)	Limons (%)	Argiles (%)	pH_{eau}	pH_{KCl}	CE (µS/cm⁻¹)	Texture
Chellata	45.88 ± 0,049 ^C	45.48 ± 235 ^A	8.63 ± 2,34 ^B	7.11 ± 0,19 ^A	6,95 ± 0,14 ^A	346,67 ± 0,58 ^A	Limoneux
Tala-Guilef	50.26 ± 0,037 ^B	42.65 ± 2,64 ^A	9 ± 1,56 ^B	6.45 ± 0,03 ^B	5,92 ± 0,09 ^B	234.67 ± 9,5 ^C	Limoneux
Ait-Ouabane	63.85 ± 0,268 ^A	19.77 ± 0,16 ^B	16.38 ± 0,11 ^A	6.20 ± 0,10 ^B	5,55 ± 0,18 ^C	251.33 ± 4,51 ^B	Limoneux sableux

Parmi les analyses physiques, la granulométrie va permettre de déterminer les proportions des particules du sol. La distinction entre « argile », « limon » et « sable » se fait uniquement sur la base de la taille des particules et non sur la base de leur nature chimique. L'analyse granulométrique permet de déterminer la texture d'un sol. À cet effet, les sols de Chellata et de Tala Guiléf ont une texture limoneuse, tandis que le sol d'Ait Ouabane est limoneux-sableux. Les trois sols étudiés peuvent présenter un phénomène de battance à cause de la présence élevée des limons (Massenet, 2013).

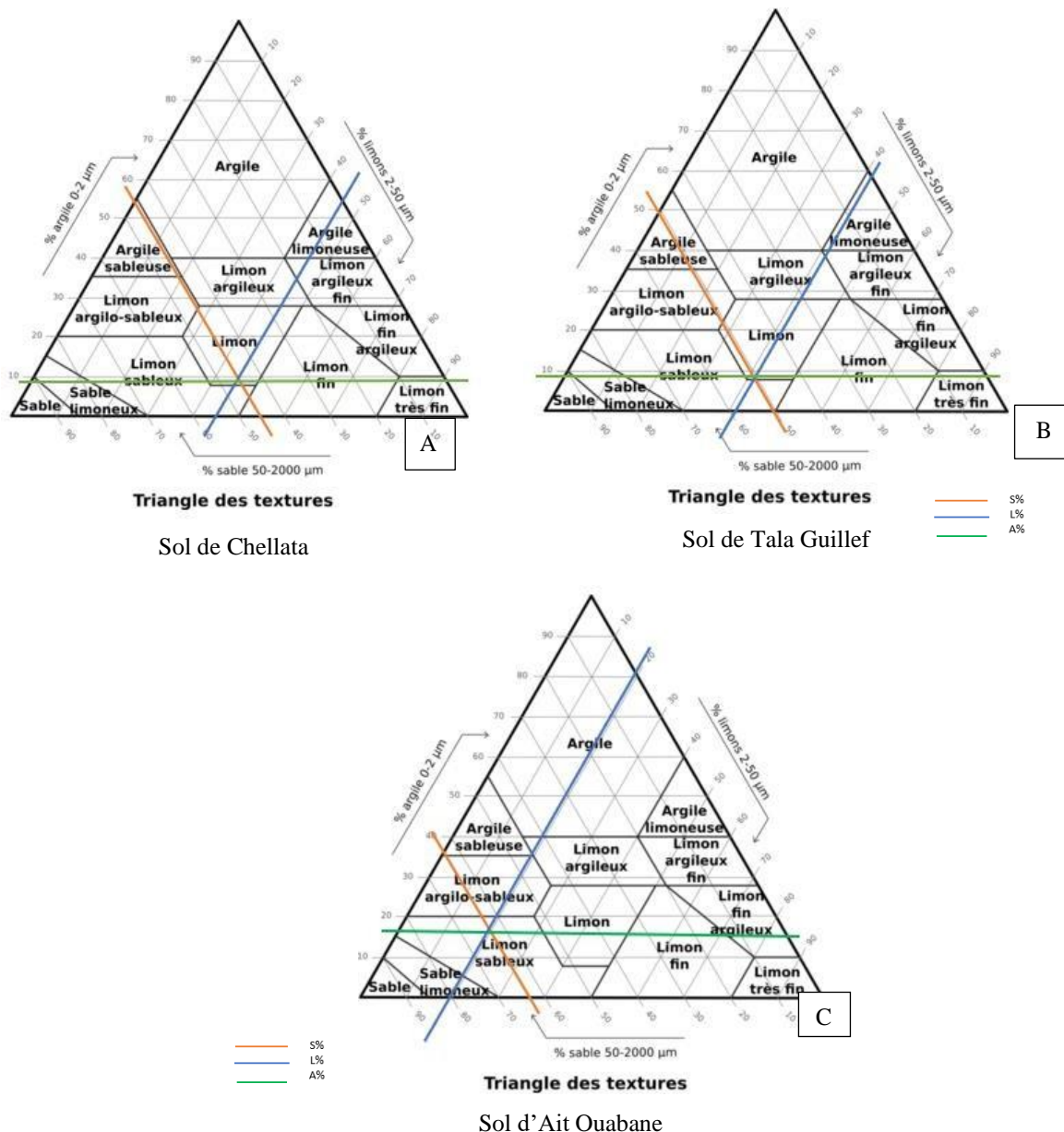


Figure 19 : les triangles de texture USDA des sols étudiés (A-B-C)

L'étude statistique (ANOVA à un facteur) nous a permis de mettre en évidence l'effet significatif de la taille des particules composant nos sols (Sables : $F= 10490,0358$; $P > 0,0001$; $DDL= 2$; Limons : $F= 39,4763$; $P > 0,0001$; $DDL= 2$ et Argiles : $F= 21,7193$; $P > 0,0018$; $DDL= 2$). Le test SNK nous a permis de classer ces sols selon le pourcentage des différentes particules les constituants. A cet effet, le sol d'Ait Ouabane s'individualise par le pourcentage des différentes particules le composant. Il est faible en limons (20%) et contient un pourcentage élevé en sables (> 60%) et un taux double en argiles, comparativement aux sols de Chellata et Tala-Guillef. Ces derniers, l'analyse statistique n'a révélée aucune différence significative.

Le complexe absorbant d'un sol est caractérisé par la présence d'ions Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ . Dans la présente étude, nous avons mesuré les teneurs en Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ . Les sols analysés présentent de faibles teneurs en Ca^{2+} , Mg^{2+} qui pourraient induire des carences chez les morphotypes de Thym étudiés. Contrairement à ces derniers, les sols étudiés enregistrent des teneurs élevées en Na^+ et K^+ allant de 17 ppm à 20 ppm pour l'ion sodium et de 22 ppm à 62 ppm pour le potassium. Ces résultats s'intègrent dans les échelles de fertilité des sols et pourraient expliquer la variabilité quantitative et qualitative des HEs extraites.

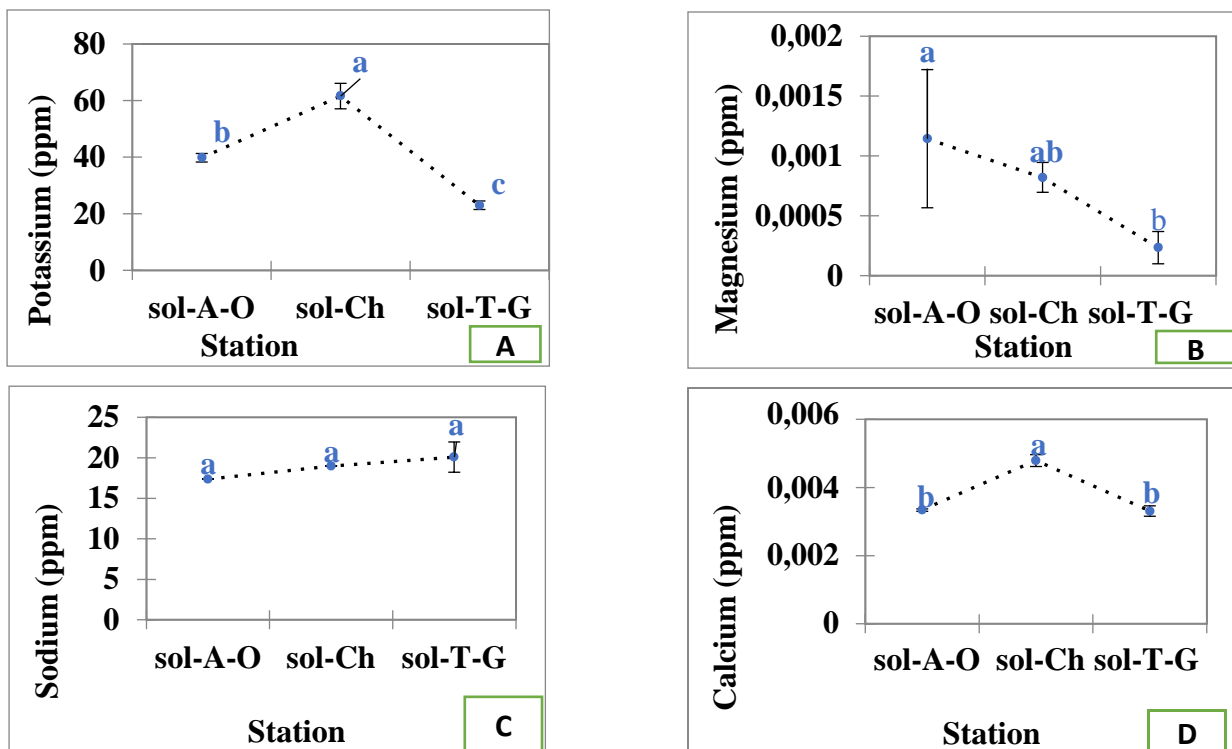


Figure 20 : Evolution spatiale des propriétés physico-chimiques des sols étudiés (sur les figures A, B, C et D). Les moyennes ne partageant aucune lettre sont significativement différentes ($p \leq 0,05$)

En plus des cations échangeables cités, un certain nombre d'ions H^+ sont libres dans les solutions du sol. Par des méthodes appropriées, on mesure leur concentration, d'où le pH qui s'exprime en nombres variant de 1 à 14. En fait, la gamme de pH habituellement reconnue pour les sols va de 3 à 10. L'analyse de variance a permis de ressortir deux groupes en fonction des valeurs de pH enregistrées :

- Le premier groupe représenté par le sol de Chellata avec un pH dans la gamme de neutralité
- Le second groupe est constitué par les sols d'Ait Ouabane et de Tala-Guillef où les pH mesurés témoignent d'une légère acidité de ces sols.

La concentration de la solution des sols étudiés en sels solubles est évaluée par la mesure de la conductivité électrique, exprimant ainsi le degré de salinité des échantillons de sol analysés. Les valeurs enregistrées oscillent entre $251.3 \mu s/cm^{-1}$ (Ait Ouabane) et $336 \mu s/cm^{-1}$ (Chellata). En se référant à l'échelle de Durand (1983), les résultats obtenus montrent que les trois sols appartiennent à la classe I, qui regroupent les sols non salés dont l'effet sur le rendement est négligeable, et ne présente aucun effet défavorable sur les cultures.

En ce qui concerne l'analyse chimique des sols étudiés, les résultats enregistrés révèlent l'absence totale du calcaire (absence d'effervescence à l'HCl). Ils sont pauvres en azote. L'analyse de la variance à un facteur a permis de distinguer deux groupes de sols en fonction de leur teneur en cet élément fertilisant. Le premier groupe est représenté par les sols de Chellata et d'Ait Ouabane avec des teneurs doublement élevées (0,38 % et 0,42 %, respectivement) par rapport au second groupe constitué par le sol de Tala-Guief (0,2 %). Quant au carbone organique, les sols étudiés présentent des teneurs allant de 3,24 % (Ait Ouabane) à 6,07 % (Chellata). Ces valeurs sont une indication de la teneur en matière organique du sol (MO) ; le Corg représentant ~57% de la MO. Cette dernière joue un rôle central dans la qualité des sols et dans le maintien de leurs fonctions clés. Les matières organiques ont un rôle essentiel en tant que moteur de l'activité biologique dans les sols car elles constituent une source nutritive importante. Elles favorisent l'action des organismes vivants et ainsi la création d'un milieu structuré dont les pores permettent une meilleure circulation de l'air et de l'eau. Elles améliorent la stabilité de la structure du sol et favorisent la rétention de l'eau par leurs propriétés colloïdales. Les groupements fonctionnels des molécules organiques augmentent la capacité d'échange cationique et donc la rétention des éléments nutritifs et des polluants. Les matières organiques améliorent également la capacité de résistance du sol aux processus d'érosion.

L'intensité de l'activité biologique du sol est évaluée par le rapport C/N. Lorsque le C/N est \leq à 10, la vitesse de décomposition de la matière organique s'accroît et l'activité biologique est bonne. La minéralisation est lente et ne restitue au sol qu'une faible quantité d'azote minéral quand le rapport C/N est supérieur à 20 (Soltner, 1988a). A cet effet, le sol de Tala-Guilef avec une faible teneur en azote est sujet à une minéralisation lente qui semble être à l'origine des variations qualitative et quantitative enregistrées dans la production des HEs du Thym de cette station.

Le phosphore, un élément au cœur du métabolisme énergétique de la plante a été dosé dans les sols étudiés par la méthode Joret-Hebert (1955). Les valeurs enregistrées révèlent des quantités faibles d'environ 9 mg/ml (7,75 ppm – 8,78 ppm). Selon Gervy (1970), un sol est considéré comme riche en phosphore assimilable lorsque sa teneur dépasse 300 ppm, moyennement riche quand cette dernière est comprise entre 150 ppm et 300 ppm, et pauvre quand elle est inférieure à 150 ppm.

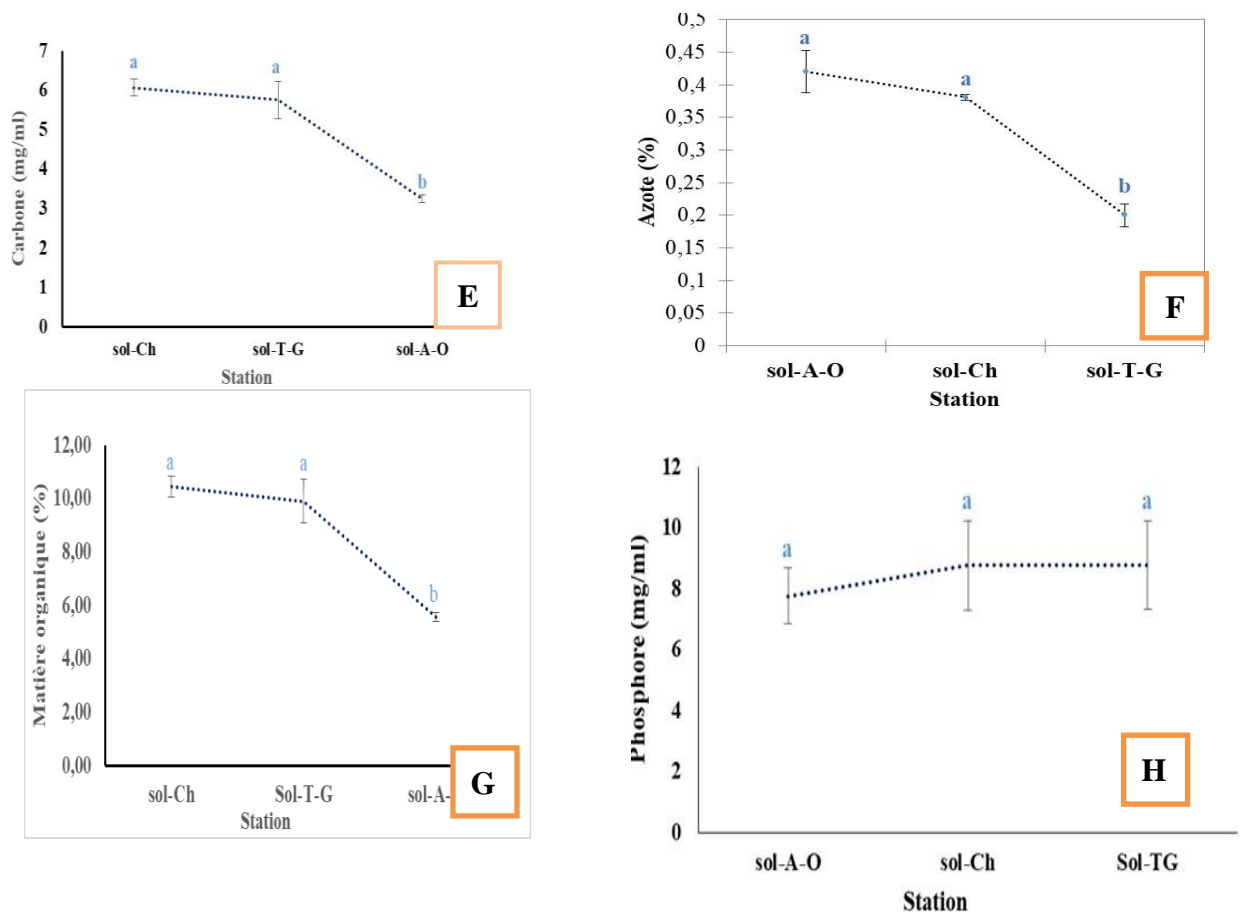


Figure 21 : Evolution spatiale des propriétés physico-chimiques des sols étudiés (sur les figures E , F , G et H , les moyennes ne partageant aucune lettre sont significativement différentes ($p \leq 005$))

4. Analyse des indices climatique et bioclimatique :

4.1. Climat

À partir de données climatiques extraites de WorldClim, nous avons pu caractériser le climat des stations d'étude à travers le calcul de certains paramètres bioclimatiques et autres indices. Les données relatives à la moyenne des précipitations annuelles sur la période 2010-2021 montrent que la pluviométrie varie globalement entre 918 mm et 976 mm. Les valeurs les plus basses sont enregistrées au niveau de la station de Tala Gilef, et les valeurs les plus élevées sont notées au niveau de la région de Ait Ouabane. Globalement, le territoire étudié est arrosé. Quant aux températures, les maximas oscillent entre 4°C et 33°C, déterminant une période de sécheresse, variable en fonction des années, de 3 à 4 mois, s'étalant de juin à septembre. Les minimas varient entre -3 °C (février 2012) et 22°C (juillet 2012 et 2017).

4.2. Bioclimat

Les bioclimats sont identifiables en calculant l'indice ombrothermique annuel I_o et l'indice de continentalité simple I_c (**Pesaresi et al., 2014**). Ces derniers sont calculés pour les trois stations d'étude, où $I_c < 23$ (21,33 - 22,04) et $I_o > 5$ (5,066 - 5,886). Selon les seuils proposés dans WBCS, les stations d'étude appartiennent au climat méditerranéen humide. Par contre, ces valeurs calculées corroborent avec les seuils des ombrotypes subhumides proposés par **Rivas-Martinez (2005)**.

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 (**Piñar et al., 2019 ; Rivas-Martínez et al., 2011**). Les valeurs de cet indice (2010-2021) sont comprises entre 21,33 (Tala Guilef) et 22,04 (Ait Ouaaabane).

Le calcul de la continentalité thermique selon la méthode de **Debrach, (1953)** il est possible de distinguer quatre types des climats :

*Le climat insulaire : $M-m < 15^\circ C$,

* Le climat littoral : $15^\circ C < M-m < 25^\circ C$,

* Le climat semi-continental : $25^\circ C < M-m < 35^\circ C$;

*Le climat continental : $M-m > 35^\circ C$

A partir de cette classification, le territoire d'étude présente un climat littoral.

Par ailleurs, le calcul de l'indice de thermicité (I_t) et la température positive (T_p) nous ont permis de différencier un seul type de climat, pour toutes les stations d'échantillonnage. Il s'agit d'un thermotype mésoméditerranéen supérieur, selon les seuils préconisés par Rivas-Martinaz en 2005. La combinaison des thermotypes avec les ombrotypes identifie les ceintures bioclimatiques (**Pesaresi et al., 2014**) : Le thermoméditerranéen supérieur sec supérieur, le mésoméditerranéen inférieur subhumide inférieur et le thermoméditerranéen inférieur sec inférieur. Toutefois, en montagne, le topoclimat prend toute son importance : la différence d'exposition au soleil entre un adret (exposé) et un ubac (ombré) crée des variations d'ensoleillement de températures importantes sur quelques centaines de mètres.

Tableau (6) : résultats des analyses climatique et bioclimatiques

Station	T°C	It	Ic	Io	Iov	Pv (mm)	Tp °C	Tn°C	Tv°C	Pp (mm)
Chellata	13,104	219,375	21,542	5,886	0,494	47,675	157,25	/	70,667	976,875
Tala-Guillef	14,611	235,625	21,333	5,443	0,411	41,250	171,75	/	72,250	931,067
Ait-Ouabane	15,170	262,535	22,0417	5,066	0,398	34,200	182,042	/	73,583	918,900

5. Relation entre les paramètres édaphiques

La matrice de corrélation (test de colinéarité) entre les paramètres du sol a permis de distinguer 153 corrélations significatives ($P < 0,001$) sur les 256 existantes (**Tableau 7 et 8**). Les corrélations les plus importantes ($P < 0,0001$) ont été enregistrées entre les paramètres : pH_{eau} avec pH_{KCl} ($r = 0,91$) ; la conductivité électrique (EC) avec Calcium (Ca^{+2}) ($r = 0,9480$); la matière organique (MO) avec le carbone organique ($r = 1$), avec les sables ($r = 0,9461$) et avec les limons ($r = 0,9580$) ; le carbone organique avec les sables ($r = 0,9461$) et avec les limons ($r = 0,580$) ; les limons avec les sables ($r = 0,9207$); et enfin le rapport C/N avec l'azote ($r = 0,9203$) .

Tableau 7: Matrice de corrélation des propriétés physico-chimique des sols étudiés

Variables	pHeau	pH kcl	Cond Elec	N	P	K	C	Na	Ca	Mg	MO (%)	S (%)	L (%)	A (%)
pHeau	1	0,9542	0,8874	0,0980	0,2984	0,7528	0,7243	0,2996	0,9218	0,0062	0,7243	-0,8254	0,6692	-0,6689
pH kcl	0,9542	1	0,8948	0,1034	0,2288	0,7456	0,7406	0,2462	0,9260	-0,0965	0,7406	-0,8313	0,6773	-0,6808
Cond Elec	0,8874	0,8948	1	0,4588	0,1091	0,9312	0,4677	0,0296	0,9736	0,2412	0,4677	-0,5796	0,3606	-0,3671
N	0,0980	0,1034	0,4588	1	-0,2284	0,7075	-0,5251	-0,7298	0,3475	0,8577	-0,5251	0,4328	-0,6270	0,5454
P	0,2984	0,2288	0,1091	-0,2284	1	0,1117	0,3651	0,0743	0,3045	-0,1065	0,3651	-0,4033	0,3113	-0,3177
K	0,7528	0,7456	0,9312	0,7075	0,1117	1	0,1638	-0,2794	0,8990	0,4917	0,1638	-0,3017	0,0489	-0,0965
C	0,7243	0,7406	0,4677	-0,5251	0,3651	0,1638	1	0,6713	0,5413	-0,5155	1,0000	-0,9727	0,9788	-0,8878
Na	0,2996	0,2462	0,0296	-0,7298	0,0743	-0,2794	0,6713	1	0,0872	-0,6012	0,6713	-0,6266	0,7166	-0,5562
Ca	0,9218	0,9260	0,9736	0,3475	0,3045	0,8990	0,5413	0,0872	1	0,1369	0,5413	-0,6674	0,4403	-0,4555
Mg	0,0062	-0,0965	0,2412	0,8577	-0,1065	0,4917	-0,5155	-0,6012	0,1369	1	-0,5155	0,4801	-0,6066	0,5774
MO (%)	0,7243	0,7406	0,4677	-0,5251	0,3651	0,1638	1,0000	0,6713	0,5413	-0,5155	1	-0,9727	0,9788	-0,8878
S (%)	-0,8254	-0,8313	-0,5796	0,4328	-0,4033	-0,3017	-0,9727	-0,6266	-0,6674	0,4801	-0,9727	1	-0,9595	0,9198
L (%)	0,6692	0,6773	0,3606	-0,6270	0,3113	0,0489	0,9788	0,7166	0,4403	-0,6066	0,9788	-0,9595	1	-0,9434
A (%)	-0,6689	-0,6808	-0,3671	0,5454	-0,3177	-0,0965	-0,8878	-0,5562	-0,4555	0,5774	-0,8878	0,9198	-0,9434	1

Tableau 8 : p-value du test de corrélation des propriétés physico-chimiques des sols étudiés

Variables	pHeau	pH kcl	Cond Elec	N	P	K	C	Na	Ca	Mg	MO (%)	S (%)	L (%)	A (%)
pHeau	0	0,0001	0,0014	0,8019	0,4354	0,0192	0,0273	0,4335	0,0004	0,9873	0,0273	0,0061	0,0487	0,0488
pH kcl	<0,0001	0	0,0011	0,7913	0,5538	0,0211	0,0225	0,5232	0,0003	0,8049	0,0225	0,0055	0,0451	0,0435
Cond Elec	0,0014	0,0011	0	0,2142	0,7800	0,0003	0,2043	0,9398	<0,0001	0,5318	0,2043	0,1019	0,3405	0,3311
N	0,8019	0,7913	0,2142	0	0,5545	0,0330	0,1466	0,0256	0,3595	0,0031	0,1466	0,2446	0,0707	0,1288
P	0,4354	0,5538	0,7800	0,5545	0	0,7748	0,3340	0,8493	0,4256	0,7851	0,3340	0,2818	0,4149	0,4048
K	0,0192	0,0211	0,0003	0,0330	0,7748	0	0,6737	0,4665	0,0010	0,1788	0,6737	0,4300	0,9006	0,8049
C	0,0273	0,0225	0,2043	0,1466	0,3340	0,6737	0	0,0477	0,1323	0,1554	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0014
Na	0,4335	0,5232	0,9398	0,0256	0,8493	0,4665	0,0477	0	0,8236	0,0868	0,0477	0,0710	0,0298	0,1199
Ca	0,0004	0,0003	<0,0001	0,3595	0,4256	0,0010	0,1323	0,8236	0	0,7255	0,1323	0,0495	0,2356	0,2179
Mg	0,9873	0,8049	0,5318	0,0031	0,7851	0,1788	0,1554	0,0868	0,7255	0	0,1554	0,1909	0,0833	0,1035
MO (%)	0,0273	0,0225	0,2043	0,1466	0,3340	0,6737	<0,0001	0,0477	0,1323	0,1554	0	<0,0001	<0,0001	0,0014
S (%)	0,0061	0,0055	0,1019	0,2446	0,2818	0,4300	<0,0001	0,0710	0,0495	0,1909	<0,0001	0	<0,0001	0,0004
L (%)	0,0487	0,0451	0,3405	0,0707	0,4149	0,9006	<0,0001	0,0298	0,2356	0,0833	<0,0001	<0,0001	0	0,0001
A (%)	0,0488	0,0435	0,3311	0,1288	0,4048	0,8049	0,0014	0,1199	0,2179	0,1035	0,0014	0,0004	0,0001	0

6. Effets des propriétés du sol sur la production des huiles essentielles

Les GLM ont montré que parmi les paramètres physicochimiques des sols analysés, seul l'azote, la matière organique et le rapport C/N ont affecté positivement le rendement des huiles essentielles des morphotypes de Thym étudiés ($P < 0,0105$ et $P < 0,0078$). Les autres éléments analysés (le carbone organique, les cations échangeables, la salinité...) n'ont pas eu d'effet sur les teneurs en huiles essentielles extraites. Parmi les particules définissant la texture de ces sols, la régression linéaire multiple a mis en évidence le rôle des limons sur la quantité des huiles extraites ($P < 0,0427$), tandis que les autres éléments (sables et argiles) n'ont pas eu d'effet significatif (Tableaux 11).

Tableau 9: paramètres du GIM des éléments minéraux majeures, carbone et matière organique et les rapports C/N et C/P des sols avec les rendements des HES

Paramètres	SE	t-value	P	Signification
N	0,4245	5,7335	<0,0105	Oui
P	0,0087	2,6636	<0,0761	Non
K	0,0057	0,9770	<0,4006	Non
C	0,0799	-2,8939	<0,0628	Non
MO	0,0000			Oui
C/N	0,0110	6,3868	<0,0078	Oui
C/P	0,3424	0,8381	<0,4635	Non

Tableau10 : paramètres du GIM des sels solubles, du pH et de la conductivité électrique avec les rendements des HES

Paramètres	SE	t-value	P	Signification
pH eau	0,4752	0,9705	<0,4034	Non
pH KCl	0,4561	-0,1860	<0,8643	Non
CE	0,0060	-0,1292	<0,9054	Non
Na	0,0618	0,2902	<0,7905	Non
Ca	402,6231	-0,6633	<0,5546	Non
Mg	227,5104	-0,6187	<0,5799	Non

Tableau 11: paramètres du GLM des éléments de textures des sols avec les rendements des HEs.

Paramètres	SE	t-value	P	Signification
N	3,6545	0,6862	<0,5419	Non
P	0,0746	-0,6846	<0,1907	Non
K	0,0490	-0,0293	<0,9785	Non
C	0,6878	1,5413	0,2209	Non
MO	0,0000			Oui
C/N	0,0944	-0,9449	0,4144	Non
C/P	2,9472	0,5864	0,5988	Non

Tableau 12: paramètres du GLM des éléments minéraux majeurs , carbone et matiere organique et les rapport C/N et C/P des sols avec l'indice d'acide des HEs

Paramètres	SE	t-value	P	Signification
pH eau	2,1488	-0,9136	0,4283	Non
pH KCl	2,0626	0,4402	0,6896	Non
CE	0,0271	0,8466	0,4594	Non
Na	0,2796	0,7455	0,5101	Non
Ca	1820,7538	0,2200	0,8400	Non
Mg	1028,8543	-0,2246	0,8368	Non

Tableau 13 : paramètres du GLM des des sels solubles, du pH et de la conductivité électrique avec l'indice d'acide .

Paramètres	SE	t-value	P	Signification
S%	0,1031	-0,1745	0,8672	Non
L%	0,0477	2,0427	0,0871	Non
A%	0,3472	0,4099	0,6961	Non

Tableau 14 : paramètres du GLM des éléments de texture des sols ave l'indice d'acide des HEs

Paramètres	SE	t-value	P	Signification
S%	0,0134	1,4521	<0,1967	Non
L%	0,0062	2,5639	<0,0427	Oui
A%	0,0453	-0,2183	<0,8345	Non

Vu le nombre important de descripteur de qualité physicochimique des HEs étudiées, nous nous sommes restreints à vérifier l'impact des paramètres édaphiques analysés sur l'indice d'acide (I_a). Ce choix est justifié par l'importance de cet indice sur la qualité de stockage des HEs. Chez les morphotypes de Thym étudiés, les GLM réalisés ont montré que seule la matière organique (MO) a influencé positivement la qualité des HEs étudiés, exprimée (la qualité) par la valeur de l'indice d'acide ($P = 0,000$). En revanche, les autres paramètres analysés n'ont pas eu d'effet sur cet indice de qualité (**Tableaux 12**).

7. Facteurs écologiques affectant la variabilité quantitative et qualitative des HEs

Pour étudier l'impact des facteurs environnementaux sur la variabilité chimique, nous avons utilisé une ACP basée sur une matrice reliant les pourcentages des principaux composants, les provenances et leurs indices bioclimatiques

7.1. Analyse en Composantes Principales

7.1.1. Valeurs propres des variables

D'après les résultats (Tableau 15), on constate que le premier axe recèle 65,31% de la variabilité totale suivi par 34,69 % 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. Le cumul atteint 100 % ce qui explique la contribution de chaque variable.

Tableau 15 : les valeurs propres des variables

	F1	F2
Valeur propre	21.5523	11.4477
Variabilité (%)	65.3099	34.6901
% cumulé	65.3099	100.0000

7.1.2. Cercle des corrélations

L'analyse montre que toutes les variables sont représentatives et contribuent à l'explication de la variance. Elle permet de voir la corrélation des variables avec les axes (**Fig. 22**).

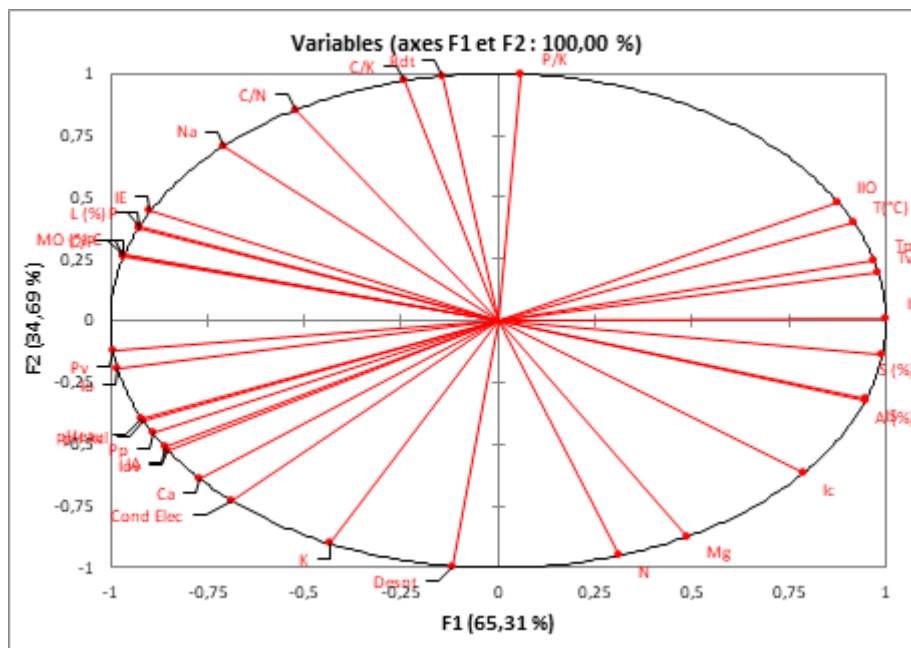


Figure 22 : cercle de corrélation de l'ACP

L'axe 1 représenté par les indices climatiques où l'indice de thermicité constitue la valeur de contribution la plus élevée (4,6395). L'axe 2 est représenté par certains paramètres physicochimiques du sol ainsi que quelques descripteurs physiques (rendement et densité) des HEs dont les valeurs de contribution les plus élevées sont 8,7054 (P/K) et 8,6129 (densité) (voir Annexe 3).

Les morphotypes du Thym étudiés sont distribués en trois groupes selon le plan de projection des axes 1 et 2 (**Figures 22 et 23**).

- Le premier groupe et le deuxième groupe s'opposent sur l'axe 1 par rapport aux variables climatiques (T, It, Tp, Tv...) d'une part et aux variables déterminant la texture et la teneur en MO des sols, d'autre part.
- Le troisième groupe est défini principalement par les variables physicochimiques du sol et la qualité physique des huiles extraites (rendement et densité).

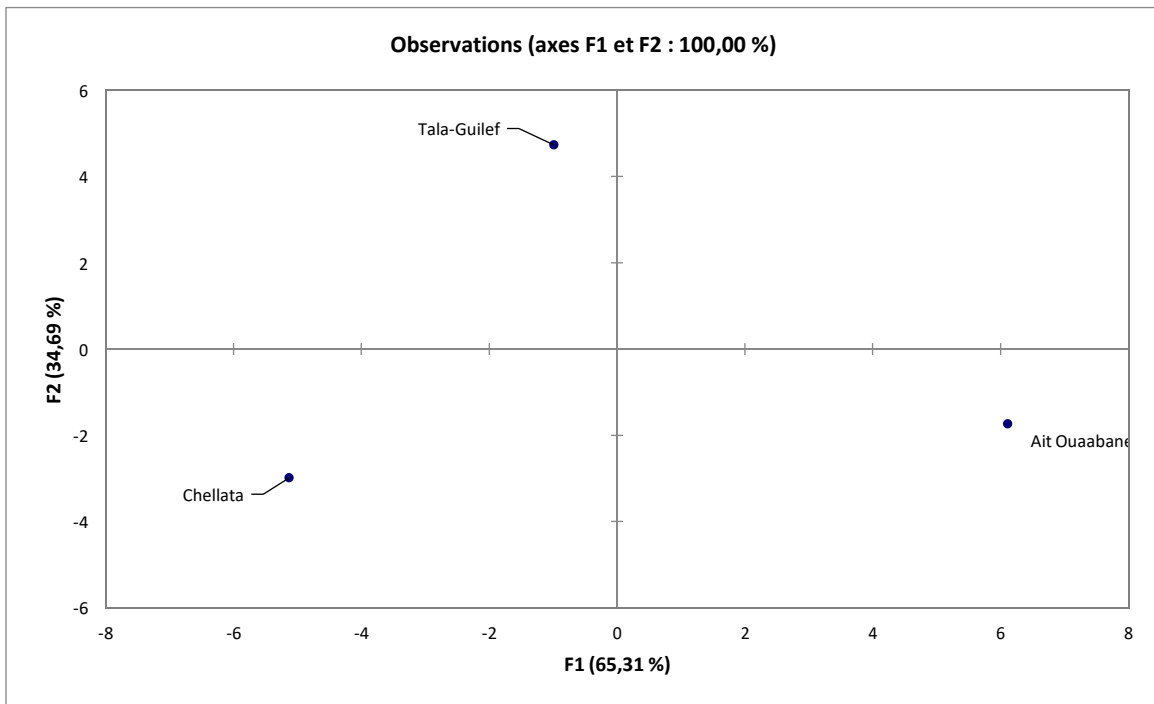


Figure23 : contribution des observations

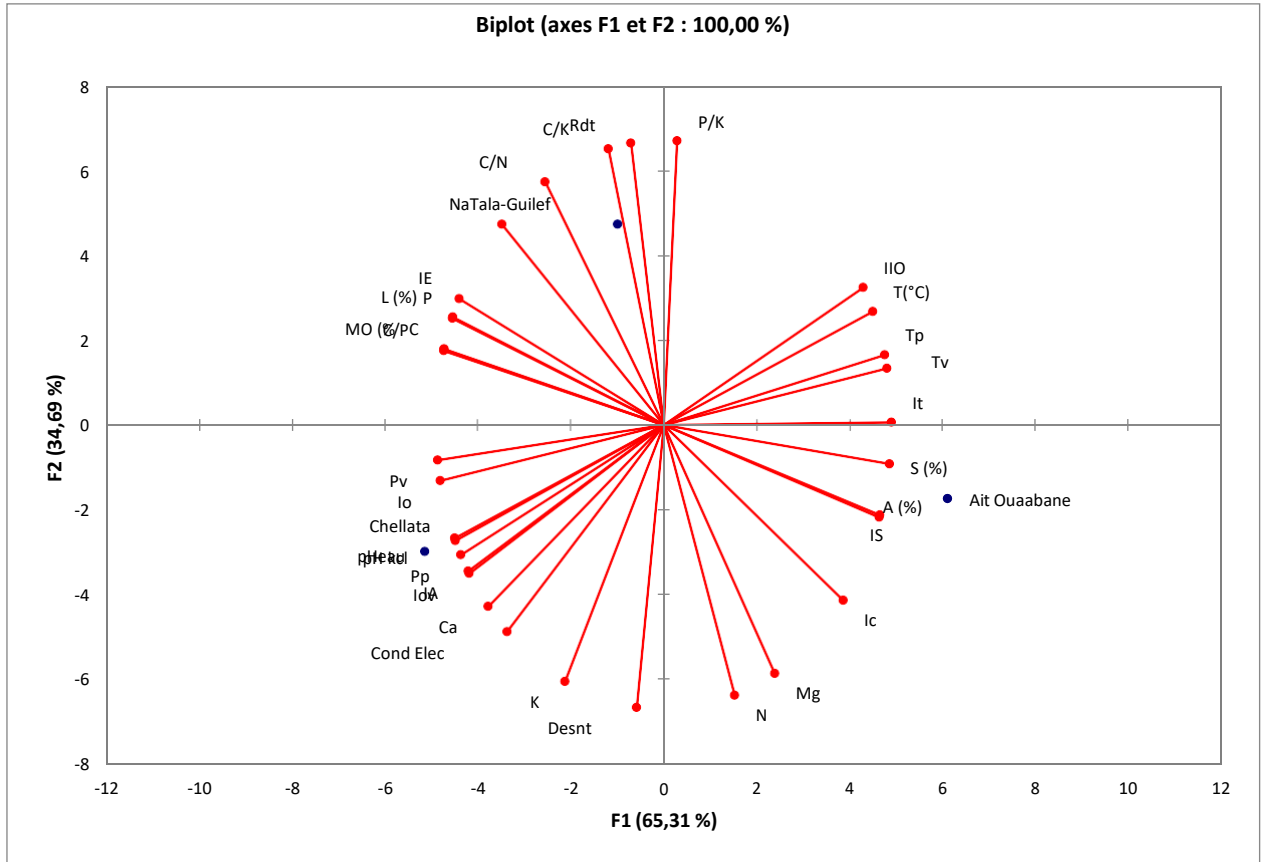


Figure 24 : biplot de l'ACP

CONCLUSION

Cette étude a pour objectif d'étudier et d'analyser l'influence des facteurs pédoclimatiques sur la qualité et la quantité des huiles essentielles de trois morphotypes du Thym, récolté dans trois habitats naturels à savoir : Chellata, Tala Guilef et Ait Ouaabane.

Les huiles essentielles des partie ariennes fleurie de cette espèce ont été obtenus par hydrodistillation à l'aide d'un hydrodistillateur de type Clvenger. Les rendements ainsi que les caractéristiques physicochimiques des HEs ont été évaluées.

Dans cette partie, il ressort que les morphotypes étudiés présentent des rendements fort appréciables allant de 1,38% à 1,39 % pour le thym des stations Chelatta et Ait-Ouaabane et un maximum de 1,77 % avec le thym de Tala-Guilef. Ils présentent des caractéristiques physiques conformes aux normes commerciales des huiles essentielles. La densité relative varie entre 0,811 et 0,89. Quant aux indices de réfractions, très proches, oscillent entre 1,474 (Ait-Ouaabane) et 1,496 (Tala-Guilef), ces extraits sont dextrogyres, dévient la lumière polarisée, leurs pouvoir rotatoire est positif et varie entre +4,25 (Chellata) et +4,35 (Tala-Guillef).

L'indice d'acide est élevé pour tous les HEs analysées (3,215-6,035) ce qui pourrait être attribué soit à la présence d'acides libres, soit à une hydrolyse des esters lors de la conservation à 4 °C. En revanche, l'indice de peroxyde, un indicateur de degré d'oxydation et d'altération des huiles essentielles est indéterminé pour les HEs extraites du Thym récolté des trois stations. Pour les autres indices mesurés, les HEs analysées présentent des valeurs très élevées, notamment celles des indices d'ester et de saponification ; supérieurs aux normes AFNOR pour les HEs. Ces valeurs indiquent la bonne qualité et la longueur de la chaîne carbonée des acides constituant ces corps gras. L'état d'insaturation des chaînes carbonées dans les corps gras est exprimé par la mesure de l'indice d'iode dont les valeurs varient entre 7,123 à 9,25 et elles sont conformes aux normes AFNOR pour les HEs.

Dans la seconde partie de cette étude, une caractérisation du climat du territoire d'étude a été réalisée par l'analyse des données climatiques extraites de WorldClim sur une période de 11 ans (2010-2021). Selon les variables climatiques de températures et de précipitation (indice de thermicité, indice de continentalité, indice ombrothermique, indice ombrothermique d'été, pluviométrie, température moyenne positives, etc.), les stations d'étude sont situées sous un climat méditerranéen, bien arrosée (les précipitations dépassant 900 mm) et une période de sécheresse s'étalant de trois à quatre mois selon les années. Le calcul de certains indices du bioclimat, nous a permis de situer les morphotypes de thym étudiés. C'est ainsi que leur répartition est de type méso-méditerranéen supérieur selon l'indice de thermicité (It), un

ombroclimat sub-humide selon l'indice ombrothermique annuelle (I_o) et d'une continentalité littorale selon (I_c).

D'après les analyses pédologiques réalisées, ce territoire présente des sols avec des pourcentages élevés en limons et en sables, définissant des textures limoneuse (Chellata et Tala Guiléf) et limoneuse sableuse (Ait Ouabane). Les éléments chimiques analysés sont variables d'une station à une autre présentant des taux en éléments nutritifs majeurs (NPK) appréciables allant, pour l'azote, de 0,38% à 0,4 2% pour Chellata et Ait Ouabane, respectivement et de 0.20% pour Tala-Guiléf. Concernant les deux éléments (PK), les taux enregistrés sont faibles pour toutes les stations. Pour les autres éléments (Mg,Ca,Na.), leurs teneurs sont variables d'une station à l'autre.

Les variations observées sont expliquées par l'interaction des facteurs du climat et du sol, déterminées statistiquement par une ACP. Les résultats montrent que les morphotypes du Thym étudiés se répartissent en trois groupes distincts :

- Le premier groupe et le deuxième groupe s'opposent sur l'axe 1 par rapport aux variables climatiques (T, I_t , T_p , T_v ...) d'une part et aux variables déterminant la texture et la teneur en MO des sols, d'autre part
- Le troisième groupe est défini principalement par les variables physicochimiques du sol et la qualité physique des huiles extraites (rendement et densité).

Afin de poursuivre cette étude, il serait intéressant d'étendre la collecte de cette espèce, poussant spontanément, dans d'autres écorégions et d'établir également leur composition chimique afin de mieux caractériser les variations étudiées en huiles essentielles de ces différents morphotypes.

Références Bibliographiques

AFNOR (2000). « Recueil des normes : les huiles essentielles. Tomes 2. Monographies relatives aux huiles essentielles » AFNOR, Paris, 661-663.

AFNOR NF T-75-111,112 & 202 : (Association Française de Normalisation, Norme). « Huiles essentielles ». Paris, France.

AFNOR NF T-75-111,112 : (Association Française de Normalisation, Norme. Huiles essentielles. Paris, France.

AFNOR, Norme NF ISO 1242. (1999). Huiles essentielles -- Détermination de l'indice d'acide. *Journal officiel.*

Afoakwa, E. O., Paterson, A., Fowler, M., & Ryan, A. (2008). Flavor formation and character in cocoa and chocolate: a critical review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 48(9), 840-857.

Aomari, L et 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, Algérie.

Aubert, G. (1978). Etude des sols de la Nouvelle-Calédonie : nouvel essai sur la classification, la caractérisation, la pédogenèse et les aptitudes des sols de Nouvelle-Calédonie: carte pédologique de la Nouvelle-Calédonie à 1/1 000 000: carte d'aptitudes culturale et forestière des sols de Nouvelle-Calédonie à 1/1 000 000. *Notice explicative*, 78.

Aubert, G. (1978). *Methodes d'analyses des sols : documents de travail tous droits reserves.* Centre régional de documentation pédagogique, CP/Dp. Marseille. 191 P

Baize, D. (1988). *Guide des analyses courantes en pédologie*, I.N.R.A, France Jouve, Paris 172p.

Benbouali, M. (2006). Valorisation des extraits de plantes aromatiques et médicinales de:«*Mentha rotundifolia et Thymus vulgaris*» (Doctoral dissertation, ACHOUR Djillali).

Bohren Ch. & Delabays N. (2005). L'allélopathie : du laboratoire aux champs. Fachtagung zur Unkrautregulierung, Tagungsunterlagen, Agroscope FAL Reckenholz.

Boukhatem, M. N., Hamaidi, M. S., Saidi, F., & Hakim, Y. (2010). Extraction, composition et propriétés physico-chimiques de l'huile essentielle du Géranium Rosat (*Pelargonium graveolens* L.) cultivé dans la plaine de Mitidja (Algérie). *Nature & Technology*, (3), 37.

Bourkhiss M., Chaouch A., Ouhssine M., Bourkhiss B. & Rassam A. (2015). Étude

Références Bibliographiques

physicochimique de l'huile essentielle de *Tetraclinis articulata* (Vahl) Masters du plateau central marocain. Les technologies de laboratoire, 9(37).

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.

Bouyahya, A., Bakri, Y., Et-Touys, A., Talbaoui, A., Khouchlaa, A., Charfi, S., & Dakka, N. (2017). Résistance aux antibiotiques et mécanismes d'action des huiles essentielles contre les bactéries. *Phytothérapie*, 16(S1), 173-183.

Bruneton, J. (2001). *Plantes toxiques, végétaux dangereux pour l'homme et les animaux.* Edition Tec & Doc, Paris.

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

Carré, P. (1953). *Précis de technologie et de chimie industrielle: Tome 1er. Les Problèmes généraux, de l'industrie chimique, par Pierre Carré... 5e édition...* J.-B. Baillièrre et fils.

Chou, C.H. (1999). *Role of allelopathy in plant biodiversity and sustainable agriculture. Critical Rev. in Plant Sciences* 18:609-636.

Combeau, A., Segalen, P., Dabin, B., Maignien, R., Bachelier, G., Schmid, M., ... & Verdier, P. (1970). *Pédologie et Développement : Techniques Rurales en Afrique 10.* Secretariat d'Etat aux Affaires Etrangères, Paris.

Conner, D. E. (1993). Naturally occurring compounds. In Davidson P. M.; Branen A. L. *Antimicrobials in foods*, 2nd Ed. Marcel Dekker, Inc., New York, N.Y. pp. 441-468.

Coquillard, P., & Hill, D. R. C. (1997). *Modélisation et simulation d'écosystèmes: des modèles déterministes aux simulations à évènements discrets.* 1ère edn. Recherche en écologie.

De Castro M.L; Jiménez-Carmona M.M. & Fernandez-Perez V. (1999). *Towards more rational techniques for the isolation of valuable essential oils from plants.* *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 18(11), 708-716

De Cliff, S., & Harerimana, P. C. (2013). *Extraction de l'Huile Essentielle Complète des Fleurs de Cananga Odorata de la Plaine de l'Imbo: Vers la Vulgarisation d'une Nouvelle Filière de Plante Industrielle au Burundi. Revue de l'Université du Burundi-Série Sciences Exactes N° 28, S-De.*

de La Charie, T. (2019). *Se soigner par les huiles essentielles : pourquoi et comment ça marche ?.* Editions du Rocher.

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

Deschepper ,R.(2017). *Variabilité de la composition des huiles essentielles et intérêt de la*

Références Bibliographiques

notion de chémotype en aromathérapie. (Doctoral dissertation). Sciences pharmaceutiques.

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

Diaaz-Reinoso B., Moure S., Domianguéz H. and Parajoa J.C. (2006). *Supercritical CO₂ extraction and purification of compounds with antioxidant activity.* Journal of Agricultural and Food Chemistry. 54, 2441-2469.

Dob, T., Dahmane, D., Benabdelkader, T., & Chelghoum, C. (2006). Studies on the essential oil composition and antimicrobial activity of *Thymus algeriensis* Boiss. et Reut. *International Journal of Aromatherapy*, 16(2), 95-100.

Dupont, F., Guignard, J.L. (2012). *Botanique, les familles de plantes.* 15th ed. Elsevier Masson SAS, Issy-les-Moulineau.

Durand, J.H. (1983). Les sols irrigables, Etude pédologique. Ed. Département de géographie de l'université de Paris. Sorbonne, 389p.

Dusenge, M. E., Duarte, A. G., & Way, D. A. (2019). Plant carbon metabolism and climate change: elevated CO₂ and temperature impacts on photosynthesis, photorespiration and respiration. *New Phytologist*, 221(1), 32-49.

EAsbahani, A., Miladi, K., Badri, W., Sala, M., Addi, E.A., Casabianca, H., & Elaissari, A. (2015). Essential oils: From extraction to encapsulation. *International journal of pharmaceutics*, 483(1-2), 220-243.

Fauconnier, M. L. (2006). HE d'Ylang Ylang: sa fiche qualitative et son suivi-exposé pour les GIE maison des Epices des Comores.

Fernandez X., Michel H. and Paris J-P. (2012). Analyses physico-chimiques des huiles essentielles, 126-144. In Chemat F., & Fernandez, X. (2012). *La Chimie des Huiles Essentielles : Tradition et Innovation.* Vuibert : Paris, France. 274 p. Kaloustian et Hadji-Minaglou, (2012).

Fernandez, X. (2017). *La chimie des huiles essentielles : tradition et innovation.* Vuibert.

Figueiredo, A. C., Barroso, J. G., Pedro, L. G., & Scheffer, J. J. (2008). Factors affecting secondary metabolite production in plants: volatile components and essential oils. *Flavour and Fragrance journal*, 23(4), 213-226.

Franchomme, P. (1999). L'aromathérapie : *Thérapeutique de pointe en médecine naturelle*, vol I-1, 1st edn. Sinceiro Entreprises Ltd.

Références Bibliographiques

- Garcia, G., Garcia, A., Gibernau, M., Bighelli, A. & Tomi, F. (2017).** Chemical compositions of essential oils of five introduced conifers in Corsica. *Natural Product Research*, 31(14), 1697-1703.
- Garnero, J. (1998).** Huiles essentielles. Techniques de l'Ingénieur, traité Constantes physico-chimiques. 1-3 pp.
- Gautreau. (1973).** Influence des facteurs climatiques sur la croissance et le développement d'une arachide hâtive.
- Gervy, R. (1970).** Les phosphates et l'agriculture. Edition Dunod, Paris. 298p.
- Goetz, P., & Ghedira, K. (2012).** Collection Phytothérapie pratique, vol. 4, phytothérapie antiinfectieuse. Springer, Paris, 357-365p.
- Gray, G., McGuinness, C., Owende, P., & Carthy, A. (2014).** A review of psychometric data analysis and applications in modelling of academic achievement in tertiary education. *Journal of Learning Analytics*, 1(1), 75–106
- Gray, S. B., & Brady, S. M. (2016).** Plant developmental responses to climate change. *Developmental biology*, 419(1), 64-77.
- Guenther, E. (1948).** The Essential Oils: History-Origin in Plants Production - Analysis, reprint, Vol. 1, 1st ed. Florida: Krieger Publishing Company.
- Guignard, J.L., Cosson, L., Henry, M. (1985).** Abrégé de Phytochimie. Masson, Paris.
- Hammaz, F et Nafa, S. (2017).** Contribution à l'essai de fabrication de pâté de volaille à base de conservateurs naturels. Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri TiziOuzou, Algérie.
- Joret G., Hebert J., 1955.** Contribution à la détermination du besoin des sols en acide phosphorique. *Ann. agron.*, 2, 233-299.
- Kaboré, I., Ouéda, A., Moog, O., Meulenbroek, P., Tampo, L., Bancé, V., & Melcher, A. H. (2022).** A benthic invertebrates-based biotic index to assess the ecological status of West African Sahel Rivers, Burkina Faso. *Journal of Environmental Management*, 307, 114503.
- Kaboré, K., Konaté, K., Sama, H., Dakuyo, R., Sanou, A., Bazié D., Diao, M., and Dicko, M. H. (2022).** Evaluation of the physicochemical parameters of edible oils sold in the three cities of Burkina Faso. *Food Science & Nutrition*, 10 (6), 2029-2035.
- Kabouche, A. (2005).** Etude photochimique de plantes médicinales appartenant à la famille des Lamiaceae. Thèse de Doctorat d'état en chimie, Université Mentouri Constantine, p 277.
- Kaloustian, J., & Hadji-Minaglou, F. (2012).** La connaissance des huiles essentielles : qualilogie et aromathérapie ; *Entre science et tradition pour une application médicale raisonnée.* Springer, 206 p.

Références Bibliographiques

- Kanko, C., Sawaliho, B.E.H., Kone, S., Koukoua, G. & N'Guessan, Y. T. (2004).** Étude des propriétés physico-chimiques des huiles essentielles de *Lippia multiflora*, *Cymbopogon citratus*, *Cymbopogon nardus*, *Cymbopogon giganteus*. *Comptes rendus chimie*, 7(10-11), 1039-1042.
- 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.
- Kouamé, F.P.B.K. (2012).** Valorisation de quatre plantes médicinales Ivoiriennes : *étude phytochimique*. Thèse de doctorat, chimie organique, Université de Nantes et de l'Université de Cocody-Abidjan. 180 p.
- Lawless, J. (1996).** *The encyclopedia of essential oils*. Element. 226 p.
- Lion. (1955).** Travaux pratique de chimie organique. Ed. Dunod, Paris.
- Lis-Balchin, M. (2006).** *Aromatherapy science: a guide for healthcare professionals*. Pharmaceutical press. 462 p.
- Lucchesi, M. E. (2005).** *Extraction Sans Solvant Assistée par Micro-ondes Conception et Application à l'extraction des huiles essentielles*. Doctoral dissertation, Université de la Réunion, France. 143 p.
- Lucchesi, M.E., Chemat, F. & Smadja, J. (2004).** Solvent-free microwave extraction of essential oil from aromatic herbs: comparison with conventional hydro-distillation. *Journal of Chromatography a*, 1043 (2), 323-327.
- Madhumita, M., Guha, P., Nag, A. (2019)** Extraction of betel leaves (*Piper betle* L.) essential oil and its bio-actives identification: process optimization, GC-MS analysis and anti-microbial activity. *Ind Crop Prod*, 138, 111578.
- Massenet Jean-Yves. (2013).** Cour de pédologie : propriétés physiques du sol. p6.
- Mirindi, E., Dusengel, A., Galvao, D., & Danielle A.** Way1,2 1 Department of Biology, University of Western Ontario, London, ON N6A 5B7, Canada; 2 Nicholas School of the Environment, Duke University, Durham, NC 27708, USA.
- Miura, P. T., Jonsson, C. M., Queiroz, S. C. D. N. D., Chagas, E. C., Chaves, F. C. M., & Reyes, F. G. R. (2021).** Ecological risk assessment of *Piper aduncum* essential oil in non-target organisms. *Acta Amazonica*, 51(1), 71-78.
- 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.
- Monin, C. (2012).** Les techniques de distillation des plantes. *La chimie des huiles essentielles: tradition et innovation*, 78-101.

Références Bibliographiques

- Morales, R. (2002).** The history, botany and taxonomy of the genus *Thymus*. In *Thyme* (pp. 15-57). CRC press.
- Morin, P., & Richard, H. (1985).** Thermal degradation of linalyl acetate during steam distillation. *Developments in food science*.
- Morin, P., Gunther, C., Peyron, L., & Richard, H. (1985).** Study of the physical and chemical phenomena involved in steam distillation. *BULLETIN DE LA SOCIETE CHIMIQUE DE FRANCE*, (5), 921-930.
- Nakatsu, T., Lupo Jr, A. T., Chinn Jr, J. W., & Kang, R. K. (2000).** Biological activity of essential oils and their constituents. *Studies in natural products chemistry*, 21, 571-631.
- Ni, J., Abrego, G. H., Constant, N., Ma, J., Hall, K. B., Cer, D., & Yang, Y. (2021).** Sentence-t5: Scalable sentence encoders from pre-trained text-to-text models. *arXiv preprint arXiv:2108.08877*.
- Özgüven, M., & Tansi, S. (1998).** Drug yield and essential oil of *Thymus vulgaris* L. as influenced by ecological and ontogenetical variation. *Turkish journal of agriculture and forestry*, 22(6), 537-542.
- Paris, R., & Godon, M. (1979).** Chromatographie en couche mince et sur papier des huiles essentielles. Ed.
- Pereira, C.G., & Meireles, M.A.A. (2010).** Supercritical Fluid Extraction of Bioactive Compounds: Fundamentals, Applications and Economic Perspectives. *Food Bioprocess*
- Périno-Issartier, S., Abert-Vian, M., & Chemat, F. (2011).** Solvent free microwave-assisted extraction of antioxidants from sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*) food by-products. *Food and Bioprocess Technology*, 4, 1020-1028.
- Perry, N. B., Anderson, R. E., Brennan, N. J., Douglas, M. H., Heaney, A. J., McGimpsey, J. A., & Smallfield, B. M. (1999).** Essential oils from Dalmatian sage (*Salvia officinalis* L.): variations among individuals, plant parts, seasons, and sites. *Journal of agricultural and food chemistry*, 47(5), 2048-2054.
- Pesaresi, S., Galdenzi, D., Biondi, E. & Casavecchia, S. (2014).** Bioclimate of Italy, application of the worldwide bioclimatic classification system. *Journal of Maps*, 10, 538-553.
- Piñar Fuentes, J. C., Cano-Ortiz, A., Musarella, C. M., Quinto Canas, R., Pinto Gomes, C. J., Spampinato, G., ... & Cano, E. (2019).** Bioclimatology, structure, and conservation perspectives of *Quercus pyrenaica*, *Acer opalus* subsp. *granatensis*, and *Corylus avellana* deciduous forests on Mediterranean bioclimate in the South-Central part of the Iberian Peninsula. *Sustainability*, 11(22), 6500.

Références Bibliographiques

- Pino-Otín, M. R., Ballester, D., Navarro, E., González-Coloma, A., Val, J., & Mainar, A. M. (2019).** Ecotoxicity of a novel biopesticide from *Artemisia absinthium* on non-target aquatic organisms. *Chemosphere*, 216, 131-146.
- Pirbalouti, A. G., Hashemi, M., & Ghahfarokhi, F. T. (2013).** Essential oil and chemical compositions of wild and cultivated *Thymus daenensis* Celak and *Thymus vulgaris* L. *Industrial Crops and Products*, 48, 43-48.
- Quezel, P et Santa, S. (1963).** Nouvelle flore d'Algérie et des régions désertiques méridionales - Tome2.
- Quezel, P., & Santa, S. (1963).** *Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales*. Eds. du Centre Nat. de la Recherche Scientifique.
- Regnault-Roger, C., Vincent, C., & Arnason, J. T. (2012).** Essential oils in insect control: low-risk products in a high-stakes world. *Annual review of entomology*, 57(1), 405-424.
- Reynaud, J. (2011) Botanique.** *Comprendre la botanique, histoire, évolution, systématique. Ellipses*, Edition, Paris.
- Riahi, L., Elferchichi, M., Ghazghazi, H., Jebali, J., Ziadi, S., Aouadhi, C., ... & Mliki, A. (2013).** Phytochemistry, antioxidant and antimicrobial activities of the essential oils of *Mentha rotundifolia* L. in Tunisia. *Industrial Crops and Products*, 49, 883-889.
- Rivas Martínez, S., 1994.** *Bioclimatic classification system of the Earth. Folia Botanica Matritensis* 12,1-23.
- Rivas-Martínez, S. (2005).** Global Bioclimatics (Clasificación Bioclimática de la Tierra). *Worldwide Bioclimatic Classification System*.
- Rivas-Martínez, S., Sáenz, S.R. & Penas, A. (2011).** *Worldwide bioclimatic classification system. Global Geobotany*, 1, 1-634
- Rouessac, F., & Rouessac, A. (2011).** *Techniques instrumentales d'analyse chimique: en 23 fiches*. Dunod.
- Russo, M., Galletti, G. C., Bocchini, P., & Carnacini, A. (1998).** Essential oil chemical composition of wild populations of italian oregano spice (*Origanum vulgare* ssp. *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.
- Saeidi, K., Moosavi, M., Lorigooini, Z., & Maggi, F. (2018).** Chemical characterization of the essential oil compositions and antioxidant activity from Iranian populations of *Achillea wilhelmsii* K. Koch. *Industrial crops and products*, 112, 274-280.
- Santoyo, S., Jaime, L., García-Risco, M. R., Ruiz-Rodríguez, A., & Reglero, G. (2014).** Antiviral properties of supercritical CO₂ extracts from oregano and sage. *International journal of*

Références Bibliographiques

food properties, 17(5), 1150-1161.

Singh, H. P., Kaur, S., Negi, K., Kumari, S., Saini, V., Batish, D. R., & Kohli, R. K. (2012). Assessment of in vitro antioxidant activity of essential oil of Eucalyptus citriodora (lemon-scented Eucalypt; Myrtaceae) and its major constituents. *LWT-Food science and Technology*, 48(2), 237-241.

Soltner, D. (1988a). Phytotechnie ; les bases de la production végétale. *Le sol-le climat-la plante*. Edition Dunod. 33-43, 51-72.

Soltner, D. (1988b). Les grandes productions végétales. *Les collections sciences et techniques agricoles*, 16eme Editions. 464P.

Soltner, D . (2005). *Les bases de la production végétale - Tome I : Le sol et son amélioration. Les collections sciences et techniques agricoles*, 22eme Editions. 472P.

Souadia, A. (2022). Chemical composition and antioxidant activity of Thymus ciliatus (Desf.) Benth. essential oils of Algeria. *Natural Product Communications*, 17(2).

Stahl-Biskup, E., & Saez, F. (Eds.). (2002). Thyme: The Genus Thymus (1st ed.)

Starmans , D.A. & Nijhuis, H.H. (1996). Extraction of secondary metabolites from plant material: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 7 (6), 191-197.

Tabassum, N., & Vidyasagar, G. M. (2013). Antifungal investigations on plant essential oils. A review. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 5(2), 19-28.

Thripathi, A. K., Upadhyay, S., Bhuiyan, M., & Bhattacharya, P. R. (2009). A review on prospects of essential oils as biopesticide in insect-pest managemen. *J. Pharmacog. Phytother*, 15, 052-053.

Turek, C. & Stintzing, F.C. (2013). Stability of essential oils: a review. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 12 (1), 40-53.

Vekiari SA, Protopapadakis EE, Papadopoulou P, Papanicolaou D, Panou C. and Vamvakias M. (2002). Composition and seasonal variation of the essential oil from leaves and peel of a lemon variety. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 5(1): 147-153.

Vidyasagar, G. M., & Tabassum, N. (2013). Antifungal investigations on plant essential oils. A review. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 5(2), 19-28.

Yaich, A ; Ghalem, N. (2021). Analyse nutritionnelle et toxicologique de deux plantes alimentaires traditionnelles « *Thymus ciliatus L et Thymus vulgaris L* ». Université Saad Dahlab blida 1. 62 p.

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	F	Pr > F
Modèle	2	0,3016	0,1508	13,1649	0,0064
Erreur	6	0,0687	0,0115		
Total corrigé	8	0,3704			

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

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	13,9286	6,9643	22,2294	0,0017
Erreur	6	1,8798	0,3133		
Total corrigé	8	15,8084			

3. Paramètre d'analyse de la variance de la Densité

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	0,0104	0,0052	2,4284	0,1688
Erreur	6	0,0128	0,0021		
Total corrigé	8	0,0232			

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	11,4863	5,7431	23,1040	0,0015
Erreur	6	1,4915	0,2486		
Total corrigé	8	12,9778			

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	50968,8417	25484,4208	1,6033	0,2768
Erreur	6	95371,9983	15895,3330		
Total corrigé	8	146340,8399			

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	122254,6858	61127,3429	3,8451	0,0842
Erreur	6	95383,8857	15897,3143		
Total corrigé	8	217638,5715			

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

1. Paramètre d'analyse de la variance du pH_{eau}

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	1,3290	0,6645	41,2150	0,0003
Erreur	6	0,0967	0,0161		
Total corrigé	8	1,4257			

2. Paramètre d'analyse de la variance du pH_{sol}

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	3,1460	1,5730	78,1728	< 0,0001
Erreur	6	0,1207	0,0201		
Total corrigé	8	3,2668			

3. Paramètre d'Analyse de la variance de la Conductivité électrique

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	17714,6667	8857,3333	60,1630	0,0001
Erreur	6	883,3333	147,2222		
Total corrigé	8	18598,0000			

4. Paramètre d'Analyse de la variance de l'Azote

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	0,0822	0,0411	90,4981	< 0,0001
Erreur	6	0,0027	0,0005		
Total corrigé	8	0,0849			

5. Paramètre d'analyse de la variance du Phosphore

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	30,2823	15,1411	0,8509	0,4728
Erreur	6	106,7688	17,7948		
Total corrigé	8	137,0511			

6. Paramètre d'analyse de la variance du Potassium

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	2246,5204	1123,2602	108,8182	< 0,0001
Erreur	6	61,9341	10,3224		
Total corrigé	8	2308,4546			

Annexe 3 : coordonnées des variables

	F1	F2
pHeau	3,9054	1,3828
pH kcl	3,8740	1,4418
Cond Elec	2,1934	4,6059
N	0,4507	7,8868
P	3,9904	1,2228
K	0,8707	7,0962
C	4,3110	0,6193
Na	2,3381	4,3336
Ca	2,7506	3,5568
Mg	1,1010	6,6625
MO (%)	4,3110	0,6193
S (%)	4,5532	0,1631
L (%)	3,9735	1,2546
A (%)	4,1505	0,9213
C/N	1,2553	6,3721
C/P	4,3257	0,5915
C/K	0,2734	8,2206
P/K	0,0159	8,7054
Rdt	0,0956	8,5553
Desnt	0,0650	8,6129
IA	3,4159	2,3043
IIO	3,5581	2,0366
IE	3,7299	1,7132
IS	4,1754	0,8745
T(°C)	3,9036	1,3861
It	4,6395	0,0007
Ic	2,8781	3,3169
Io	4,4618	0,3353
Iov	3,3755	2,3804
Pv	4,5689	0,1336
Tp	4,3594	0,5281
Tv	4,4564	0,3455
Pp	3,6731	1,8200