

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la

Recherche Scientifique

Université Abou Bekr BELKAÏD - TLEMCEM

Faculté des Sciences

Département de Chimie

Cours

Chimie des composés volatils- Aromathérapie

Adressé aux étudiants niveau : Master Chimie (M1 et
M2)

Option : « Chimie des Produits Naturels »

Domaine : Sciences de la Matière

Filière : Chimie

Spécialité : Chimie

Etabli Par :

Dr TABET ZATLA Amina

Année : 2022-2023

Tél.: 043 21 63 70 / Tél&Fax: 043 21 63 68 / 043 21 63 71

Site Web: www.fs.univ-tlemcen.dz

Email : vdrpg.facscience@gmail.com

Table des Matières

Table des Matières.....	I
Avant propos	V
Table des Tableaux	VI
Table des Illustrations	VII
INTRODUCTION	1
LES HUILES ESSENTIELLES.....	4
I. GENERALITES.....	5
I.1. Définitions	5
I.1.1. Huiles Essentielles	5
I.1.2. Aroamthérapie.....	6
I.1.3. Chémotype ou chimiotype	6
I.2. Propriétés physiques	7
II. UTILISATIONS DES HUILES ESSENTIELLES	8
II.1. En pharmacie.....	9
II.2. Dans l'industrie alimentaire.....	12
II.3. En agriculture	14
II.4. En cosmétologie et parfumerie	15
II.5. Dans l'industrie.....	18
III. OBTENTION DES HUILES ESSENTIELLES.....	19
III.1. Origine et rôle des huiles essentielles	19
III.2. Techniques d'extraction.....	23
III.2.1. Hydrodistillation	24
III.2.2. Entraînement à la vapeur.....	26
III.2.3. Vapo-hydrodistillation.....	28
III.2.4. Distillation sèche	29
III.2.5. Expression à froid	30
III.2.6. Enfleurage et extraction par les graisses chaudes	31
III.2.7. Extraction par les solvants	32

III.2.8.	Extraction par le CO ₂ supercritique	33
III.2.9.	Extractions assistées par les micro-ondes.....	35
III.3.	Transformations chimiques au cours de l'extraction.....	36
III.4.	Critères de qualité d'une huile essentielle.....	37
III.4.1.	Relatifs à la matière première végétale	37
III.4.2.	Relatifs à l'huile essentielle	41
III.4.3.	Relatifs à la Pharmacopée Européenne	43
III.4.4.	Critères de qualité « économique ».....	44
IV.	Composition chimique	45
IV.1.	Matériel et méthodes d'étude	45
IV.1.1.	Chromatographie en phase gazeuse (CPG)	46
IV.1.2.	Chromatographie sur couche mince (CCM).....	47
IV.2.	Les familles chimiques des huiles essentielles	48
IV.2.1.	Composés terpéniques.....	49
IV.2.1.1.	Les Monoterpènes C ₁₀	49
IV.2.1.2.	Les Carbures sesquiterpéniques C ₁₅	51
IV.2.1.3.	Les Carbures terpéniques lourds (C ₂₀ à C ₄₀).....	51
IV.2.2.	Les composés oxygénés	52
IV.2.2.1.	Aldéhydes.....	52
IV.2.2.2.	Cétones.....	52
IV.2.2.3.	Alcools et phénols	53
IV.2.2.4.	Aldéhydes	56
IV.2.2.5.	Acides.....	57
IV.2.2.6.	Esters	58
IV.2.2.7.	Ethers	59
IV.2.2.8.	Phénols.....	60
IV.2.2.9.	Oxydes	61
IV.2.2.10.	Lactones.....	62
IV.2.2.11.	Couramines	62

IV.3.	Variabilité de la composition.....	63
IV.3.1.	Espèce et variété	64
IV.3.2.	Chémotype.....	64
IV.3.3.	Partie de la plante utilisée.....	65
IV.3.4.	Période de récolte et cycle végétatif.....	66
IV.3.5.	Facteurs environnementaux	68
IV.3.6.	Traitements post-récolte et conservation	72
IV.3.7.	Normalisation des Huiles essentielles	76
IV.4.	Propriétés des différents composés.....	77
IV.4.1.	Terpènes.....	78
IV.4.1.1.	Carbures monoterpéniques	78
IV.4.1.2.	Carbures sesquiterpéniques	79
IV.4.1.3.	Carbures terpéniques lourds (C20 à C40)	80
IV.4.2.	Alcools et phénols	80
IV.4.2.1.	Phénols.....	80
IV.4.2.2.	Monoterpénols	81
IV.4.2.3.	Sesquiterpénols.....	82
IV.4.2.4.	Diterpénols	82
IV.4.3.	Aldéhydes	83
IV.4.3.1.	Aldéhydes terpéniques.....	83
IV.4.3.2.	Aldéhydes aromatiques.....	84
IV.4.4.	Acides.....	84
IV.4.5.	Esters	85
IV.4.6.	Éthers	88
IV.4.6.1.	Phénols méthyl-éthers	88
IV.4.6.2.	Éthers-oxydes	89
IV.4.7.	Cétones.....	90
IV.4.8.	Oxydes terpéniques	91
IV.4.9.	Lactones	92

IV.4.10. Coumarines.....	92
IV.4.11. Phtalides	93
IV.4.12. Composés azotés et soufrés	94
CHEMOTYPE ET AROMATHERAPIE	95
I. L'aromathérapie.....	96
I.1. Généralités.....	96
I.2. Voie d'administration des huiles essentielles.....	97
I.3. Propriétés reconnues des huiles essentielles.....	100
I.4. Toxicité des huiles essentielles	102
II. INFLUENCE DU CHEMOTYPE.....	103
II.1. Dans le choix des matières premières.	103
II.2. Dans le choix en thérapeutique	107
BIBLIOGRAPHIE.....	109

Avant propos

L'objectif de cet ouvrage est de fournir aux étudiants du Master Chimie, de spécialité : « Chimie des Produits Naturels », une compréhension approfondie du domaine de la chimie des composés volatils, avec un accent particulier sur les huiles essentielles.

Dans une première partie de cet ouvrage, nous étudierons l'origine des huiles essentielles, leur différentes méthodes d'extraction, en mettant en évidence les avantages et les limitations de chaque méthode ainsi que les facteurs pouvant influencer sur leur composition chimique. La seconde partie traitera de l'importance grandissante de la notion de chémotype en aromathérapie.

Nous espérons que ce manuel atteindra ses objectifs ; que le lecteur n'hésite pas à nous faire part de ces critiques et remarques. Nous l'en remercions d'avance.

Table des Tableaux

Tableau 1 : Liste des huiles essentielles dont la délivrance au public est réservée aux pharmaciens [2-4].....	10
Tableau 2 : Exemple des huiles essentielles pouvant être utilisées dans les produits cosmétiques [1] [7].	18
Tableau 3 : Intérêts et inconvénients des différents procédés de distillation [11].....	28

Table des Illustrations

Figure 1 : Cellule sécrétrice d'huile essentielle dans un rhizome de gingembre (<i>Zingiber officinale</i> Roscoe) au microscope électronique à balayage (image colorisée, x813) [9].	21
Figure 2 : Poils sécréteurs présents sur la face inférieure d'une feuille de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) au microscope électronique à balayage (x504) [10].	22
Figure 3 : Poches schizogènes d'une feuille d'eucalyptus citronné vues en microscopie électronique à balayage (image colorisée, x204) [9].	23
Figure 4 : Différents extraits aromatiques obtenus à partir de matières végétales	24
Figure 5 : Schéma d'un alambic [11].	25
Figure 6 : Schéma d'une installation d'entraînement à la vapeur [11].	27
Figure 7 : Schéma d'une installation de vapo-hydrodistillation [11].	28
Figure 8 : Schéma d'une installation de distillation sèche [11].	30
Figure 9 : Schéma simplifié d'un extracteur au CO ₂ supercritique [11].	34
Figure 10 : <i>Mentha x piperita</i> L. : plante fraîche (a), feuilles séchées (b), chromatogramme sur couche mince (c), poil tecteur au microscope optique (d) [13].	39

INTRODUCTION

Depuis toujours, les huiles essentielles et les plantes aromatiques ont été utilisées quotidiennement par l'humanité à des fins variées, notamment pour se parfumer, cuisiner et se soigner. Ces substances volatiles sont extraites de différentes parties des plantes, telles que les feuilles, les fleurs, les tiges ou les écorces, et sont réputées pour leurs arômes caractéristiques et leurs propriétés thérapeutiques.

Leur utilisation nécessite une connaissance approfondie et une utilisation responsable pour profiter de leurs avantages potentiels tout en minimisant les risques.

L'histoire de l'aromathérapie a connu quatre périodes principales. Dans les temps les plus anciens, les plantes aromatiques étaient utilisées entières, généralement en infusion ou décoction.

Dans une seconde époque, elles ont été brûlées ou mises à macérer dans des huiles végétales. L'activité est alors attribuée aux substances odorantes. La période qui a suivi est celle de l'extraction de cette substance odorante et de la création de la distillation. La notion d'huile essentielle fait alors son apparition.

La quatrième et actuelle période correspond au développement des connaissances sur les huiles essentielles par tous les moyens modernes, que cela concerne leurs propriétés physiques, chimiques ou physiologiques.

L'aromathérapie moderne commence au début du XX^{ème} siècle avec l'établissement de preuves sur le pouvoir antiseptique des huiles essentielles. Le premier à se consacrer à l'étude de leurs propriétés est Gattefossé, parfumeur et ingénieur chimiste de formation. Alors qu'il se brûle dans une explosion de son laboratoire, il plonge par réflexe sa main dans l'huile essentielle de lavande. Le soulagement immédiat et la guérison rapide qui suivra attirent son intérêt. Il décide alors d'étudier les huiles essentielles et leurs propriétés. Un regain d'intérêt pour les huiles essentielles se manifeste à partir des années 1960-1970 avec la publication de plusieurs ouvrages de références. Un nombre croissant d'études scientifiques s'intéresse au sujet, permettant à la fois d'accroître nos

connaissances sur la composition chimique des huiles essentielles mais également sur leurs applications possibles, notamment sur le plan médical.

L'engouement actuel pour les huiles essentielles n'est pas que scientifique. Il s'inscrit également dans la volonté du public d'un retour vers le « naturel », réputé à tort sans risque, mêlée de défiance à l'égard du chimique.

Les huiles essentielles gagnent donc du terrain dans de nombreux domaines : cosmétiques, agro- alimentaire, bien-être et bien sûr santé. Elles peuvent se trouver dans n'importe quel réseau de distribution : pharmacie, marché, magasins bio, grande distribution...

Pourtant, si elles sont un atout pour soigner de nombreux maux, les huiles essentielles sont loin d'être sans danger. Pour se faire dans de bonnes conditions, leur usage passe par la maîtrise de leurs propriétés et de leurs dangers. Ceci nécessite de savoir « lire » dans leur composition chimique.

L'activité et la composition d'une huile essentielle ne sont pas liées de manière linéaire, mais un changement important du profil chimique d'une huile essentielle permet d'anticiper les variations de son activité.

La composition de l'huile essentielle issue de deux plantes d'une même espèce botanique n'est pas constante. Sous l'influence de facteurs extérieurs, elle peut même présenter des spécificités biochimiques très différentes, on parle alors de chémotype.

LES HUILES ESSENTIELLES

I. GENERALITES

I.1. Définitions

I.1.1. Huiles Essentielles

Selon la Pharmacopée européenne, une huile essentielle est un produit odorant, généralement complexe, obtenu à partir d'une matière première végétale botaniquement définie. Elle peut être obtenue :

- Soit par entraînement à la vapeur,
- Soit par distillation sèche
- Soit par un procédé mécanique approprié sans chauffage.

L'huile essentielle est généralement séparée de la phase aqueuse par un procédé physique sans changement significatif de sa composition. Les matières premières végétales peuvent être fraîches, flétries, sèches, entières, contuses ou pulvérisées, à l'exception des fruits du genre Citrus, qui sont toujours traités à l'état frais. Pour les fruits du genre Citrus, l'AFNOR utilise le terme "essence" au lieu d'"huile essentielle".

Les huiles essentielles peuvent subir diverses modifications, telles que

- La déterpénation (élimination partielle ou totale des hydrocarbures monoterpéniques).
- La déterpénation et la désesquiterpénation (élimination partielle ou totale des hydrocarbures mono- et sesquiterpéniques).
- La rectification (distillation fractionnée visant à supprimer ou modifier certains constituants) ou la privation d'un ou plusieurs constituants par séparation partielle ou complète.

Il est important de distinguer l'essence végétale (sécrétion naturelle synthétisée par les plantes aromatiques et excrétée dans des organes spécifiques) de l'huile essentielle obtenue par distillation. L'extraction de l'essence végétale peut entraîner des

transformations de certains constituants, telles que des réarrangements moléculaires ou une hydrolyse.

I.1.2. Aromathérapie

L'aromathérapie est l'utilisation des huiles essentielles à des fins thérapeutiques, préventives ou curatives. Les huiles essentielles peuvent être utilisées par voie interne, cutanée ou par inhalation.

I.1.3. Chémotype ou chimiotype

Le chémotype (également appelé chimiotype ou race chimique) est une notion clé en aromathérapie. Ce terme a été utilisé pour la première fois en 1968 par le Dr R. Santesson et son fils. Il se réfère à un "groupe chimiquement défini au sein d'une population d'individus morphologiquement indiscernables".

Le chémotype permet de distinguer différentes huiles essentielles produites à partir de plantes de la même espèce, mais ayant une composition chimique différente. Cette distinction est basée sur la dénomination scientifique de l'espèce plutôt que sur la dénomination commune.

Ainsi, par exemple, le thym à thymol et le thym à linalol (tous deux issus de *Thymus vulgaris* L.) sont différents de la lavande fine et de la lavande aspic (*Lavandula angustifolia* Mill. et *Lavandula latifolia* Medik.) [1].

Les individus d'une même espèce botanique, qui possèdent le même génome et le même phénotype, peuvent présenter des différences significatives dans leur composition chimique en raison de divers facteurs environnementaux tels que la qualité du sol, le climat, l'altitude, l'humidité, etc. Cette variabilité est particulièrement observée dans le cas des huiles essentielles.

I.2. Propriétés physiques

Les huiles essentielles partagent certaines propriétés physiques, mais celles-ci peuvent varier en fonction de leur composition chimique. À température ambiante, les huiles essentielles sont généralement **liquides**, mais il existe des exceptions où elles peuvent être visqueuses, pâteuses ou même solides, en fonction de l'espèce végétale.

Par exemple, l'huile essentielle de myrrhe (*Commiphora myrrha* (T. Nees) Engl.) est visqueuse, celle de bois de gaïac (*Bulnesia sarmienti* Lorentz ex. Griseb.), est pâteuse, celle de cèdre de Virginie (*Juniperus virginiana* L.) est solide, et celle de rose (*Rosa x damascena* Mill.) ou de badiane (*Illicium verum* Hook. F.) peut être un mélange solide-liquide [1].

Les huiles essentielles sont **volatiles**, ce qui les rend entraînaibles par la vapeur et leur confère une odeur caractéristique. Cette volatilité varie en fonction de leur composition chimique, les monoterpènes étant plus volatils que les sesquiterpènes, par exemple.

Les huiles essentielles sont également **lipophiles**, ce qui signifie qu'elles sont peu solubles dans l'eau en général, bien que certains de leurs composants puissent présenter une certaine solubilité. Leur solubilité est meilleure dans les huiles grasses, les alcools concentrés et les solvants organiques.

La **couleur** des huiles essentielles peut être très variable, allant de l'ultra-violet au bleu, du vert émeraude au vert franc, du rouge au jaune pâle, ou simplement une teinte jaune presque imperceptible. La couleur peut être influencée par la présence de composés spécifiques tels que le chamazulène ou l'azulène. Les huiles essentielles peuvent également changer de couleur en vieillissant, ce qui peut indiquer une oxydation et un risque potentiel de toxicité.

La **densité** des huiles essentielles, mesurée par rapport à celle de l'eau à 20°C, varie en fonction de leur composition chimique. En général, la densité des huiles essentielles est inférieure à 1, bien qu'il puisse y avoir des exceptions. Certaines huiles essentielles ont une

densité très proche de celle de l'eau, tandis que d'autres peuvent avoir une densité supérieure, notamment celles de gaulthérie couchée ou d'oignon.

L'indice de réfraction est une mesure du changement de direction subi par un rayon lumineux lorsqu'il passe d'un milieu optique à un autre, tel que de l'air à une huile essentielle, à une température de 20°C. Il s'agit d'une grandeur sans unité qui peut être mesurée à l'aide d'un réfractomètre selon la norme NF T 75-112. Dans le cas des huiles essentielles, l'indice de réfraction est généralement élevé.

Le pouvoir rotatoire est une caractéristique des molécules chirales, qui exprime leur capacité à dévier la lumière polarisée. Il s'agit de l'angle, exprimé en milliradians ou en degrés, par lequel le plan de polarisation d'une radiation lumineuse est dévié lorsqu'elle traverse une solution contenant des molécules chirales. La mesure est effectuée à l'aide d'un polarimètre selon la norme NF T 75-113. Les huiles essentielles ont une activité variable sur la lumière polarisée en fonction de la nature et de la concentration des différentes molécules chirales qu'elles contiennent.

Par exemple, on peut mesurer des valeurs de +105° pour l'huile essentielle d'orange (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) et de -17,75° pour l'huile essentielle de menthe poivrée (*Mentha x piperita* L.) [1].

II. UTILISATIONS DES HUILES ESSENTIELLES

Les huiles essentielles étaient autrefois réservées à la parfumerie et à la médecine, mais elles sont désormais omniprésentes dans notre quotidien. Elles sont utilisées dans de nombreux produits cosmétiques, produits d'hygiène et parfums d'ambiance. Elles sont également utilisées dans des huiles aromatiques pour les massages bien-être et commercialisées sous forme de mélanges visant à purifier l'air pollué. De plus, elles suscitent un intérêt croissant de la part de l'industrie et de l'agroalimentaire.

On estime qu'il existe environ 3000 types d'huiles essentielles connues, dont environ 300 sont d'un intérêt commercial, principalement pour l'industrie du parfum et des

arômes. Les huiles essentielles présentent de nombreuses propriétés exploitables, ce qui leur permet de trouver des applications dans divers domaines.

Par exemple, l'huile essentielle de menthe poivrée (*Mentha x piperita* L.) est utilisée comme agent de saveur dans les dentifrices par l'industrie cosmétique, ainsi que dans les liqueurs, les chewing-gums, les glaces et les chocolats par l'industrie agroalimentaire. En aromathérapie, cette huile essentielle est recherchée pour ses propriétés antalgiques, anesthésiques, toniques et stimulantes du système nerveux central, ainsi que ses propriétés digestives.

Quant à l'huile essentielle de basilic (*Ocimum basilicum* L.), elle est utilisée par l'industrie du parfum, l'agroalimentaire l'utilise comme arôme pour les sauces et les condiments, et en médecine elle est utilisée comme antispasmodique et régulateur du système nerveux [1].

II.1. En pharmacie

Depuis de nombreux millénaires, les huiles essentielles et les plantes aromatiques sont utilisées par l'humanité à des fins thérapeutiques. De nos jours, les médecines naturelles, incluant l'aromathérapie, connaissent une popularité croissante auprès du public.

L'aromathérapie gagne en importance à mesure que les bienfaits des huiles essentielles sont reconnus. La plupart des huiles essentielles sont actuellement disponibles à la vente libre, sans nécessiter de contrôle médical.

Cependant, certaines huiles essentielles sont réservées à la délivrance par les pharmaciens, conformément au décret N° 2007-1221 du 3 août 2007 relatif au monopole pharmaceutique, article D. 4211-13 du Code de la Santé Publique. Le tableau 1 répertorie ces huiles essentielles.

Tableau 1 : Liste des huiles essentielles dont la délivrance au public est réservée aux pharmaciens [2-4].

Famille	Nom commun	Nom latin	Conditions particulières	Justification de la restriction
Amaranthaceae	Chénopode vermifuge	Chenopodium ambrosioides L. C. anthelminticum L.	Liste II des substances vénéneuses	Présence d'ascaridole (peroxyde monoterpénique toxique)
Apiaceae	Fenouil	Foeniculum vulgare L.	Délivrance sur ordonnance et inscription à l'ordonnancier	Peut servir à la fabrication de boissons alcooliques
	Anis étoilé ou Badiane	Illicium verum Hook. F.	Délivrance sur ordonnance et inscription à l'ordonnancier	
	Anis vert	Pimpinella anisum L.	Délivrance sur ordonnance et inscription à l'ordonnancier	
Astéraceae	Grande absinthe	Artemisia absinthium L.	Aucune	Présence de thuyone (cétone monoterpénique hautement convulsivante et hallucinogène)
	Petite absinthe	Artemisia pontica L.	Aucune	
	Armoise commune	Artemisia vulgaris L.	Aucune	
	Armoise blanche	Artemisia herba alba Asso	Aucune	
	Armoise arborescente	Artemisia arborescens L.	Aucune	
	Tanaisie	Tanacetum vulgare L.	Aucune	
Brassicaceae	Moutarde jonci forme	Brassica juncea (L.) Czernj. et Cosson	Liste II des substances vénéneuses	Contient de l'allylthiocyanate (toxique, notamment sur le plan neurologique)

Cupressaceae	Thuya duCanada ou Cèdre blanc	<i>Thuya occidentalis</i> L.	Aucune	Présence de thuyone (cétone monoterpénique hautement convulsivante ethallucinogène)
	Cèdre de Corée dit « cèdre feuille »	<i>Thuya koraensis</i> Nakai	Aucune	
	Thuya	<i>Thuya plicata</i> Donn ex D. Don.	Aucune	
	Sabine	<i>Juniperus sabina</i> L.	Liste I des substances vénéneuses	Neurotoxique, présence de thuyone (cétone monoterpénique hautement convulsivante et hallucinogène), de sabinol (alcool terpénique neurotonique) et du pyrogallol (bloque le système digestif des animaux, mortel)
Lamiaceae	Hysope	<i>Hyssopus officinalis</i> L.	Délivrance sur ordonnance et inscription à l'ordonnancier	Peut servir à la fabrication de boissons alcooliques
	Sauge officinale	<i>Salvia officinalis</i> L.	Aucune	Présence de thuyone (cétone monoterpénique hautement convulsivante ethallucinogène)
Lauraceae	Sassafras	<i>Sassafras albidum</i> (Nutt.) Nees	Aucune	Présence de safrol (toxique et cancérigène)
Rutaceae	Rue	<i>Ruta graveolens</i> L.	Liste I des substances vénéneuses	Présence de méthyl heptyl cétone (hautement neurotoxique et abortif)

Il est extrêmement important de faire preuve d'une grande prudence lors de l'utilisation des huiles essentielles en raison des risques élevés de mésusage et d'intoxication.

L'aromathérapie représente une utilisation relativement minoritaire des huiles essentielles, ne représentant que 2% du marché mondial.

L'industrie pharmaceutique utilise de plus en plus les huiles essentielles sous diverses formes telles que des complexes à vaporiser, des pastilles, des gélules, des dentifrices, etc.

Ces préparations contenant des huiles essentielles sont réglementées en tant que médicaments à base de plantes. De plus en plus, ces produits sont enregistrés en tant que compléments alimentaires, ce qui implique une réglementation moins contraignante.

Les huiles essentielles peuvent également être utilisées simplement comme excipients dans d'autres médicaments, servant par exemple d'arôme pour masquer le goût d'un principe actif, comme agent de pénétration percutanée ou encore comme source de précurseur d'hémisynthèse. Par exemple, les citrals sont utilisés dans la production de vitamine A.

Il convient également de mentionner l'intérêt croissant de la médecine vétérinaire pour les huiles essentielles. Leurs propriétés antifongiques et antibactériennes sont exploitées, notamment depuis que l'utilisation d'antibiotiques a été restreinte dans les élevages par l'Union européenne en 2006. Ainsi, les huiles essentielles sont utilisées aujourd'hui comme répulsifs ou insecticides, comme conservateurs dans l'alimentation animale, ou tout simplement pour traiter différentes affections chez les animaux.

II.2. Dans l'industrie alimentaire

Les plantes aromatiques ont été initialement utilisées par l'homme pour enrichir la cuisine. Les Égyptiens utilisaient des mélanges contenant des huiles essentielles qu'ils chauffaient afin de diffuser des odeurs, stimulant ainsi l'appétit des personnes malades.

Les huiles essentielles sont devenues des arômes naturels et des exhausteurs de goût dans de nombreux secteurs de l'industrie agroalimentaire, tels que les liqueurs, les boissons, les confiseries et les plats cuisinés. En général, les huiles essentielles issues

d'épices et d'aromates sont privilégiées dans les préparations salées, tandis que les huiles essentielles d'agrumes sont préférées pour les parfums plus sucrés.

La consommation d'huiles essentielles dans l'industrie agroalimentaire augmente en parallèle de la demande croissante de produits naturels de la part des consommateurs, ainsi que de la mauvaise réputation des conservateurs de synthèse. Le secteur qui consomme le plus d'huiles essentielles est celui des boissons gazeuses. L'huile essentielle d'orange douce (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) est la plus utilisée dans le monde de l'agroalimentaire.

Les huiles essentielles sont très aromatiques, ce qui en fait des arômes naturels de choix. Bien qu'il existe un risque théorique lié aux substances potentiellement toxiques présentes dans certaines huiles essentielles, les quantités utilisées sont très faibles, ce qui rend le danger peu probable.

Au cours des deux dernières décennies, de nombreuses études ont été réalisées sur de nouvelles applications possibles des huiles essentielles dans l'industrie agroalimentaire. Certaines sont utilisées comme antioxydants, remplaçant ainsi les conservateurs chimiques potentiellement toxiques et de plus en plus impopulaires. Un certain nombre d'herbes aromatiques, notamment de la famille des Lamiacées, se sont révélées efficaces pour la conservation de la viande ou de certains plats cuisinés.

Leur activité antimicrobienne bien connue est également exploitée pour prolonger la durée de conservation des aliments. Par exemple, les huiles essentielles de cannelle, de coriandre, de thym et d'origan sont efficaces pour la conservation de la viande, tandis que la menthe est plus efficace pour contrôler les contaminations dans les yaourts.

La double fonction des huiles essentielles en tant qu'arômes et agents antimicrobiens peut être à la fois un avantage et un obstacle à leur utilisation, car elles peuvent modifier les caractéristiques organoleptiques des aliments.

Enfin, les contaminations fongiques peuvent rendre les denrées alimentaires impropres à la consommation en produisant des mycotoxines ou simplement les détruire.

Certaines huiles essentielles ont une action antifongique à large spectre qui pourrait être exploitée pour la conservation des aliments.

Par exemple, l'huile essentielle de thym (*Thymus vulgaris* L.) présente une meilleure activité antifongique que la plupart des agents chimiques actuellement utilisés (benzimidazole, diphénylamine, acétate phénylmercurique, zinc diméthylthiocarbamate, carbendazime, Sulphur 80% WP), pour une toxicité et un coût potentiellement moindres [5].

II.3. En agriculture

L'utilisation des huiles essentielles dans le domaine de l'agriculture est encore au stade préliminaire mais est destinée à se développer. Les réglementations actuelles encouragent fortement le développement de produits phytosanitaires d'origine naturelle en tant qu'alternative aux méthodes de lutte chimique.

Les huiles essentielles sont actuellement testées sur diverses cibles, telles que les insectes, les champignons, les bactéries, les mauvaises herbes, ainsi que pour la conservation des semences. Dans certains pays d'Europe, des produits à base d'huiles essentielles sont déjà commercialisés.

Par exemple, l'huile essentielle de clou de girofle (*Syzygium aromaticum* L.) est utilisée pour lutter contre les maladies de conservation des pommes et des poires. La menthe verte (*Mentha spicata* L.) est utilisée pour inhiber la germination des pommes de terre. L'huile essentielle d'orange douce (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) est proposée pour lutter contre diverses maladies et insectes tels que le mildiou, l'oïdium, la rouille blanche, les cicadelles et les aleurodes.

Mais l'arrivée de nouveaux produits à base d'huiles essentielles sur le marché est retardée en raison de réglementations complexes. En effet, leur autorisation est soumise à la réglementation des produits phytopharmaceutiques, ce qui nécessite de prouver l'efficacité et l'innocuité du produit [6].

II.4. En cosmétologie et parfumerie

Les huiles essentielles sont largement utilisées dans le monde entier pour leur parfum. Un exemple notable est l'eau de Cologne, dont la formule, développée par Jean-Marie Farina au début du 18ème siècle, contenait principalement des huiles essentielles d'agrumes (fleur d'oranger, cédrat, bergamote) et d'aromates (romarin, thym), ainsi que des extraits de fleurs (huiles essentielles de lavande et de rose double, eau de mélisse et extrait de jasmin).

Les huiles essentielles sont considérées comme les matières premières de prédilection des parfumeurs et sont classées en fonction de leurs odeurs. Par exemple, les huiles essentielles de citron, de bergamote ou de lavande sont utilisées pour créer la note de tête, qui est la plus éphémère. Les essences florales telles que la rose ou le néroli contribuent à la note de cœur. Enfin, la note de fond, la plus durable, comprend généralement des essences boisées ou épicées comme le santal ou la cannelle.

La cosmétologie attache une grande importance aux huiles essentielles et à leurs nuances subtiles, tandis que la parfumerie se tourne de plus en plus vers les produits de synthèse en raison de leur prix et de leur disponibilité constante.

Dans le domaine de la parfumerie, qu'elle soit cosmétologique ou technique, la qualité d'une huile essentielle est principalement jugée par son odeur. Cependant, cela ne s'applique pas nécessairement à la cosmétologie en général, où les huiles essentielles présentent l'avantage d'être à la fois des ingrédients actifs, parfumés et naturels. Par conséquent, la composition chimique des huiles essentielles, tant qualitative que quantitative, est étroitement examinée dans le cadre de leur utilisation et de la communication qui en découle.

Il existe toute une gamme de stratégies d'utilisation et de communication des huiles essentielles :

- Certaines marques les utilisent sans le revendiquer et les considèrent comme des ingrédients parmi d'autres.

- D'autres marques les utilisent et les mettent en avant, mais les intègrent au même titre que d'autres ingrédients, qu'ils soient naturels ou non.
- Certaines marques les utilisent, les revendiquent et affichent un choix de formulation résolument naturelle, tout en incluant une faible proportion de produits d'origine minérale.
- Il y a aussi des marques "100% Bio" qui n'utilisent que des ingrédients naturels ou d'origine naturelle, principalement d'origine végétale. Les huiles essentielles sont dans ce cas largement utilisées et mises en avant.

De nos jours, l'utilisation des huiles essentielles est réglementée, notamment dans les domaines de la parfumerie et du cosmétique. Ces deux domaines sont soumis au règlement cosmétique européen, qui définit un produit cosmétique comme toute substance ou mélange destiné à entrer en contact avec les parties superficielles du corps humain dans le but de les nettoyer, parfumer, modifier leur apparence, les protéger, les maintenir en bon état ou corriger les odeurs corporelles.

La frontière entre cosmétique et médicament est parfois floue, car de nombreuses huiles essentielles sont également utilisées dans des préparations médicales, dépassant ainsi le cadre de la cosmétologie. Il est donc nécessaire d'être prudent dans l'utilisation des huiles essentielles en cosmétique.

Les huiles essentielles sont utilisées non seulement comme principes actifs, mais aussi comme excipients dans les formulations cosmétiques, dans le but de remplacer les produits chimiques, notamment les conservateurs, et de répondre à la demande croissante de produits naturels de la part du public.

En ce qui concerne leur activité antioxydante, les huiles essentielles présentent des avantages et des inconvénients. Les produits cosmétiques contiennent souvent des huiles riches en acides gras insaturés qui doivent être protégées de l'oxydation, responsable du rancissement. Les antioxydants utilisés dans les milieux lipophiles doivent être solubles, volatils et stables. Les huiles essentielles sont naturellement solubles dans les huiles,

répondant ainsi au premier critère, mais leur volatilité élevée limite leur utilisation généralisée.

Les huiles essentielles font également l'objet de nombreuses recherches en cosmétique pour leurs propriétés antibactériennes et antifongiques. Pour les fabricants, leur utilisation permet de communiquer sur leur activité biologique ou leur pouvoir parfumant sans les qualifier de conservateurs. Cependant, leur utilisation présente des limites. Les concentrations nécessaires pour être efficaces sont souvent plus élevées que celles couramment utilisées en cosmétique, leur parfum puissant et parfois désagréable constitue également un frein. À ces concentrations, elles peuvent provoquer des réactions allergiques.

Leur utilisation est donc réglementée, notamment par la directive 2003/15/CE qui établit une liste de 26 allergènes, dont 17 sont naturellement présents dans les huiles essentielles, et qui doivent être obligatoirement étiquetés au-delà d'une certaine concentration (0,001% dans les produits non rincés et 0,01% dans les produits rincés).

Tableau 2 : Exemple des huiles essentielles pouvant être utilisées dans les produits cosmétiques [1] [7].

Famille	Nom Latin	Nom commun	Composés majoritaires	Avantages / Inconvénients
Cupressaceae	<i>Juniperus communis</i> L.	Genévrier	α-pinène, limonène	Odeur forte/désagréable
Lamiaceae	<i>Thymus vulgaris</i> L.	Thym (chémotypes phénoliques)	Thymol, carvacrol	Odeur forte/désagréable
	<i>Lavandula angustifolia</i> Mill.	Lavande	Acétate de linalyle, linalol	oration en tant qu'actif
	<i>Origanum vulgare</i> L.	Origan	carvacrol, thymol	Odeur forte/désagréable
Myrtaceae	<i>Melaleuca alternifolia</i> Cheel	Arbre à thé	erpinèn-4-ol, γ-terpinène	Odeur forte/désagréable
Poaceae	<i>mbopogon citratus</i> (DC.) Stapf	Citronnelle	Néral, géranial	Pro-oxydant

Comme mentionné précédemment, les huiles essentielles sont attrayantes car elles possèdent à la fois des propriétés actives, odorantes et véhiculent une image de naturalité pour les produits.

II.5. Dans l'industrie

Chacun des domaines précédemment mentionnés représente déjà, dans une certaine mesure, des applications industrielles en raison des volumes utilisés et des exigences des utilisateurs. Par exemple, la demande de matières premières de qualité constante et bien connue est une préoccupation majeure.

Les huiles essentielles sont utilisées dans la composition d'une large gamme de produits industriels. Leur utilisation s'étend de l'industrie des détergents (où la majorité de la production mondiale d'huiles essentielles de lavandin est utilisée dans les lessives et adoucissants) aux colles et vernis, en passant par la désinfection des locaux.

L'industrie chimique s'intéresse également aux mélanges complexes de molécules présentes dans les huiles essentielles. Elles constituent une source de molécules pouvant être utilisées telles quelles.

Les molécules isolées à partir des huiles essentielles peuvent également servir de base à des réactions d'hémisynthèse. Dans ce cas, l'intérêt est principalement économique, car l'hémisynthèse est souvent plus rentable que la synthèse totale de nouvelles molécules.

III. OBTENTION DES HUILES ESSENTIELLES

III.1. Origine et rôle des huiles essentielles

Toutes les plantes ont potentiellement la capacité de produire des essences, bien que la plupart du temps à l'état de traces. Les plantes dites "aromatiques" sont celles qui en produisent en quantité relativement importante, avec une teneur d'environ 1% dans la plante. Selon Lawrence, il y aurait environ 17 500 plantes aromatiques, principalement parmi les végétaux supérieurs. Bien que les plantes aromatiques se trouvent dans de nombreuses familles botaniques, certaines familles regroupent un grand nombre d'espèces concernées, telles que les Lamiacées, les Astéracées, les Apiacées, les Cupressacées, les Rutacées, les Lauracées et les Myrtacées.

Les plantes, comme tous les êtres vivants, ont besoin d'énergie qu'elles obtiennent à partir de substances organiques issues de leur métabolisme. On distingue deux types de métabolismes :

- **Le métabolisme primaire**, qui produit des molécules largement répandues (lipides, protéines et glucides). Ces molécules sont essentielles à la vie de la plante et servent également de précurseurs pour la synthèse du métabolisme secondaire.

- **Le métabolisme secondaire**, qui conduit à la formation de molécules plus spécifiques et qui permet à la plante de s'adapter à son environnement (et qui entraîne donc la formation des essences). Ce sont souvent ces familles de molécules qui possèdent des activités biologiques particulières.

La fonction exacte des essences pour la plante est encore mal connue, mais elles semblent jouer un rôle important dans son adaptation à l'environnement. Certains composés volatils présents dans les essences modulent le comportement des microorganismes, des champignons, des insectes et des herbivores. Ainsi, les essences pourraient servir de mécanismes de défense contre les prédateurs, de répulsifs pour les insectes et les herbivores, ou encore de protection contre les pathogènes. Elles peuvent également attirer des insectes pollinisateurs ou des disséminateurs de graines. Les essences sont impliquées dans des processus allélopathiques (interactions biochimiques directes ou indirectes, positives ou négatives, entre les plantes) et des interactions tritrophiques, qui impliquent trois niveaux d'une chaîne alimentaire, généralement une plante, un herbivore et son prédateur ou parasite [8].

Les essences jouent également un rôle pour la plante elle-même. Certains de leurs composants pourraient agir comme des messagers internes ou des intermédiaires du métabolisme de la plante. Enfin, les essences pourraient servir de source d'énergie lorsque l'activité de photosynthèse n'est plus suffisante.

Les essences sont synthétisées dans divers tissus sécréteurs présents dans tous les organes de la plante.

Par exemple, les fleurs (bergamotier), les feuilles (menthe poivrée), mais aussi dans des écorces (cannelier de Ceylan), des bois (santal), des racines (angélique), des rhizomes (gingembre), des fruits (badiane), ou encore des graines (muscade).

Ces tissus sécréteurs peuvent également produire des résines, qui ont une composition chimique similaire aux huiles essentielles mais qui ne sont pas volatiles et

insolubles dans l'eau. Il existe quatre types de structures sécrétrices, notamment les cellules sécrétrices isolées.

Ces cellules se trouvent dans tous les tissus de la plante, mais elles sont plus fréquentes au niveau de l'épiderme, principalement dans les feuilles et les organes floraux. Les essences produites ne restent pas à l'intérieur de la cellule, mais s'accumulent généralement dans une vacuole en dehors du cytoplasme. Des cellules sécrétrices de ce type se trouvent, par exemple, dans les organes floraux des Rosacées ou dans les organes souterrains du gingembre (*Zingiber officinale Roscoe*).

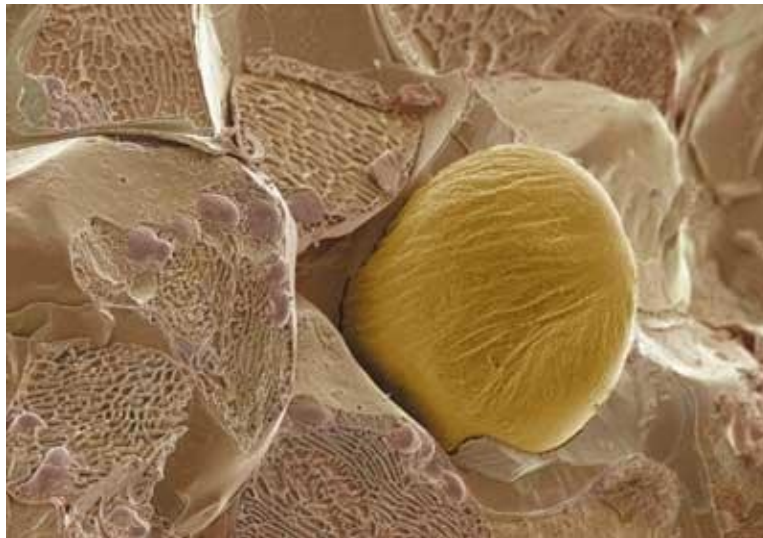


Figure 1 : Cellule sécrétrice d'huile essentielle dans un rhizome de gingembre (*Zingiber officinale Roscoe*) au microscope électronique à balayage (image colorisée, x813) [9].

- Les poils sécréteurs

Ce sont des structures qui varient beaucoup et peuvent être composées d'une ou de plusieurs cellules. Ils résultent de la différenciation de cellules épidermiques et sont ancrés par une cellule basale, avec une ou plusieurs cellules sécrétrices au-dessus. L'essence produite par ces cellules s'accumule entre la membrane et la cuticule.

On trouve ces structures dans de nombreuses familles, telles que les Lamiacées ou les Solanacées.

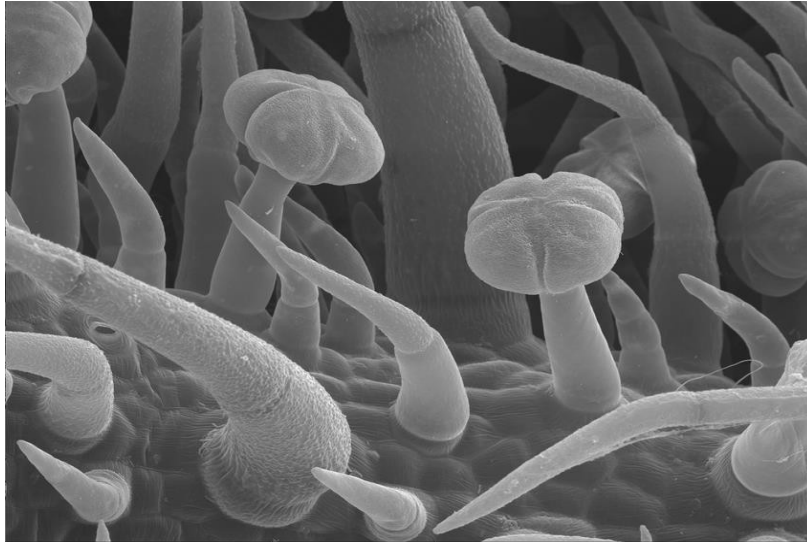


Figure 2 : Poils sécréteurs présents sur la face inférieure d'une feuille de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) au microscope électronique à balayage (x504) [10].

- Les poches sécrétrices

Les poches sécrétrices sont des cavités présentes dans le parenchyme de certains organes, délimitées par des cellules sécrétrices qui y déversent leurs produits de sécrétion. Elles ont une forme arrondie et proviennent d'une seule cellule qui se divise de deux manières différentes, ce qui permet de distinguer les poches schizogènes des poches schizolysigènes.

Dans le cas des poches schizogènes, les cellules se séparent et forment un espace central où l'essence s'accumule. Ces poches sont présentes, par exemple, chez l'eucalyptus (*Eucalyptus globulus* Labill.). Les poches schizolysigènes se forment de la même manière, mais elles impliquent également la lyse des cellules en contact direct avec la cavité. On les trouve dans le péricarpe des agrumes (Rutaceae).

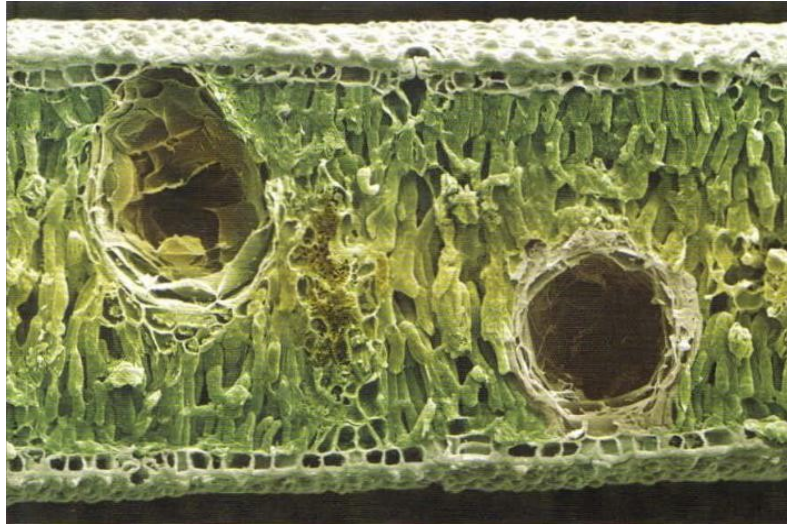


Figure 3 : Poches schizogènes d'une feuille d'eucalyptus citronné vues en microscopie électronique à balayage (image colorisée, x204) [9].

- Les canaux sécréteurs

Leur origine est proche de celle des poches schizogènes, mais ils viennent d'une file de cellules et non d'une unique cellule. En s'écartant, ces cellules ne forment plus une poche mais un canal qui recueille les sécrétions. Ces canaux sont par exemple présents dans le fruit de l'anis (*Pimpinella anisum* L.).

III.2. Techniques d'extraction

Une fois que la matière première végétale est identifiée, il est important d'utiliser une méthode d'extraction appropriée pour obtenir les huiles essentielles. Selon la neuvième édition de la Pharmacopée européenne, les huiles essentielles peuvent être obtenues par les méthodes suivantes :

- Hydrodistillation
- Distillation sèche
- Procédé mécanique sans chauffage

Il existe d'autres méthodes d'extraction utilisées dans des domaines autres que la santé. Par conséquent, à partir d'une même matière première végétale, il est possible d'obtenir une multitude d'extraits différents, dont les huiles essentielles. La Figure 4 présente les principales options d'extraction des composés aromatiques.

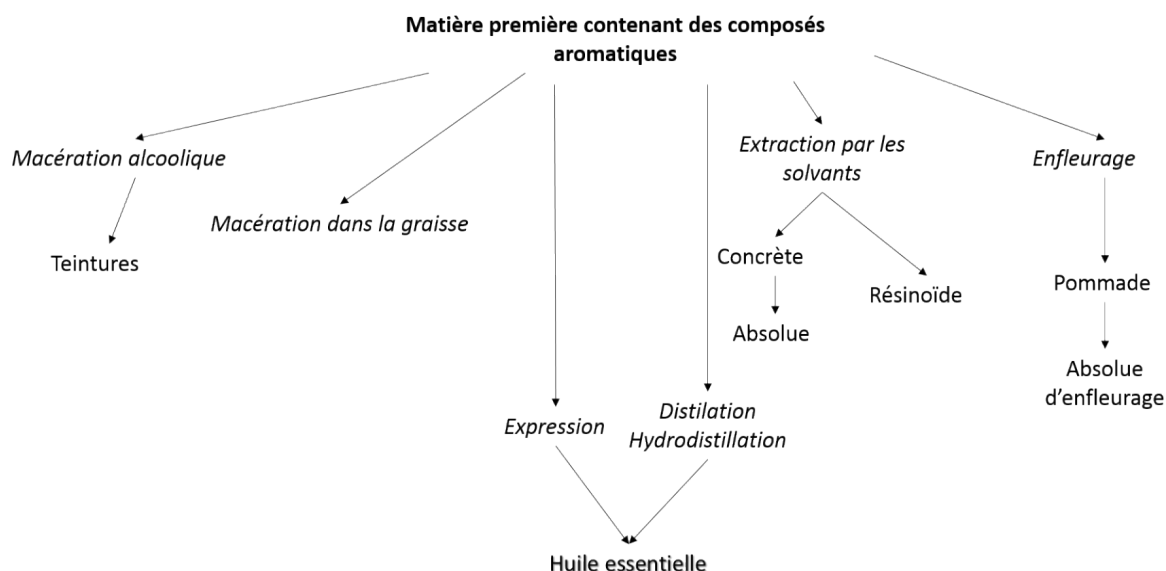


Figure 4 : Différents extraits aromatiques obtenus à partir de matières végétales

Il existe pour chacune de ces méthodes d'extraction de nombreuses variantes. À l'heure actuelle, la distillation reste la méthode de référence.

III.2.1. Hydrodistillation

La distillation est une technique ancienne qui remonte à environ 5000 ans dans la vallée de l'Indus. Cette méthode d'extraction a été transmise par les Arabes et perfectionnée par les industriels de Grasse, dans les Alpes-Maritimes. Bien que l'une des plus anciennes, la distillation est également l'une des plus simples.

Elle est progressivement remplacée par de nouveaux procédés de distillation en raison de considérations de qualité et de coûts de production. Aujourd'hui, la distillation est une méthode normalisée pour l'extraction des huiles essentielles et pour le contrôle de leur qualité.

Le principe général de l'hydrodistillation, représenté dans la figure 5, est le suivant : une suspension de matière première végétale dans l'eau est chauffée dans un alambic jusqu'à ce qu'elle atteigne le point d'ébullition. La vapeur d'eau entraîne alors les substances volatiles de la plante. Cette vapeur est ensuite récupérée et condensée. L'huile essentielle, qui est composée de ces différentes substances volatiles, se sépare naturellement de l'eau par gravité, car elle n'est pas miscible avec cette dernière.

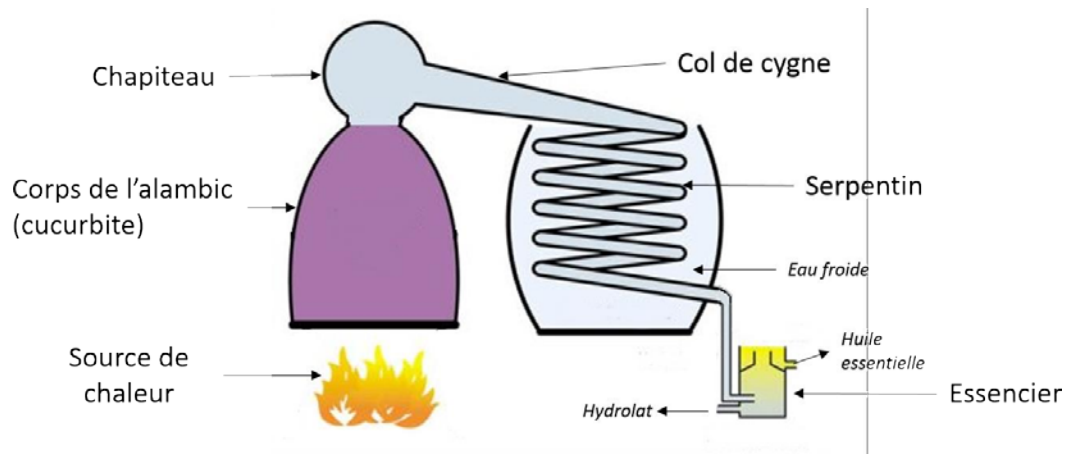


Figure 5 : Schéma d'un alambic [11].

L'application de chaleur sur la matière première végétale lors de la distillation provoque la rupture des cellules et la libération des molécules qu'elles contiennent. Cela crée un mélange azéotrope composé d'eau et de molécules volatiles dont la température d'ébullition est proche de 100°C, alors que la température d'ébullition des molécules aromatiques pures est souvent beaucoup plus élevée. Ainsi, l'hydrodistillation permet de limiter le chauffage nécessaire pour extraire les substances volatiles de la matière première.

La distillation peut être réalisée avec ou sans recyclage de la phase aqueuse (cohobage). Dans le cas du cohobage, l'eau est récupérée après séparation de l'huile essentielle et réintroduite directement dans le mélange eau/matière première. Ce système est avantageux car il garantit la présence constante d'eau dans l'alambic, ce qui permet de limiter les variations de température susceptibles d'entraîner une dégradation rapide de la matière première végétale. Un dispositif d'agitation peut également être utilisé pour éviter l'accumulation de matière solide au fond de la cuve.

La durée d'extraction varie selon les plantes et peut atteindre plusieurs heures. Elle a un impact sur le rendement et la composition finale de l'huile essentielle. En effet, les essences riches en composés lourds nécessitent un temps de chauffage plus long pour assurer une extraction satisfaisante.

Il est possible d'effectuer le travail dans un circuit à pression réduite, en particulier pour les molécules difficiles à entraîner. Cela permet de considérablement réduire la température d'ébullition et donc de limiter les dégradations liées à la chaleur. Cependant, le coût d'un tel équipement et de son fonctionnement restreint son utilisation. Des technologies telles que les micro-ondes ou les ultrasons peuvent assister l'extraction, réduisant ainsi le temps nécessaire tout en améliorant le rendement.

Ce procédé d'extraction présente plusieurs avantages. Tout d'abord, il est relativement simple à mettre en œuvre et son coût est faible, ce qui en fait une méthode économiquement intéressante. De plus, grâce au brassage de la matière végétale en suspension dans l'eau, l'eau peut pénétrer au cœur de celle-ci, contrairement à d'autres méthodes où la vapeur d'eau ne peut pas atteindre toutes les parties de la plante. Cela est particulièrement bénéfique pour des matériaux tels que les pétales de roses, qui ont tendance à s'agglomérer et qui peuvent donc être mal extraits par entraînement à la vapeur.

Cette méthode présente certains inconvénients qui expliquent pourquoi elle est progressivement remplacée par d'autres techniques. Tout d'abord, elle est adaptée à une échelle de production plus restreinte que d'autres méthodes. De plus, elle est plus lente que l'entraînement à la vapeur et nécessite donc une plus grande quantité d'énergie, ce qui atténue l'avantage initial de son faible coût. Dans ce processus, la matière première est en contact prolongé avec de l'eau à température élevée pendant plusieurs heures, ce qui favorise certaines transformations au sein de l'huile essentielle. Les esters sont partiellement hydrolysés, les hydrocarbures monoterpéniques acycliques et les aldéhydes ont tendance à polymériser. De plus, certains composés oxygénés, tels que les phénols, se dissolvent partiellement dans l'eau présente dans l'alambic et ne sont donc pas extraits efficacement.

III.2.2. Entraînement à la vapeur

L'entraînement à la vapeur d'eau est une méthode plus récente de distillation qui présente certaines différences par rapport à l'hydrodistillation. Dans cette technique, il n'y a

pas de contact direct entre la matière végétale et l'eau. Au lieu de cela, de la vapeur d'eau est produite dans une chaudière distincte, puis injectée à la base de l'alambic où se trouve la plante. La vapeur traverse la plante en remontant dans l'alambic, provoquant l'éclatement des cellules et la formation d'un mélange azéotrope. Ce mélange est récupéré en haut de la cuve et condensé (Figure 6).

L'un des principaux avantages de cette méthode par rapport à l'hydrodistillation est la préservation de la qualité de l'huile essentielle. En évitant la macération de la plante dans l'eau, les phénomènes d'hydrolyse et de solubilisation de certains composés hydrosolubles, tels que les phénols, sont limités, ce qui permet une meilleure extraction de ces composés. De plus, le risque de dégradation par la chaleur est mieux contrôlé, car le chauffage ne se fait pas directement sur la cuve contenant la matière végétale. La production de vapeur dans une chaudière externe permet de contrôler la quantité, la pression et la température de l'extraction, et elle contribue à réduire le temps d'extraction et les besoins énergétiques. Enfin, l'entraînement à la vapeur permet généralement des extractions à plus grande échelle.

Cette méthode présente certaines limitations en termes de coûts d'installation, qui sont plus élevés que ceux de l'hydrodistillation. Cela pose un problème de rentabilité pour les huiles essentielles qui sont produites en grande quantité et qui ont un faible prix sur le marché. De plus, l'accès à l'équipement nécessaire peut être un défi dans les régions économiquement défavorisées.

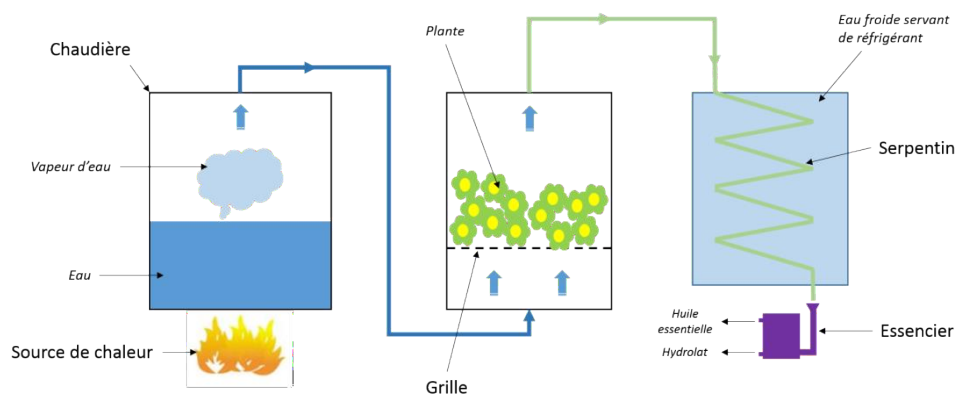


Figure 6 : Schéma d'une installation d'entraînement à la vapeur [11].

Une autre variante de la méthode d'entraînement à la vapeur est l'hydrodiffusion, également connue sous le nom de percolation. Dans cette approche, le flux de vapeur n'est plus dirigé de bas en haut, mais traverse la plante à partir du haut de la cuve et est récupéré à la base. Cette méthode est encore plus économique en termes de temps et

d'énergie, car elle nécessite moins de vapeur. Elle est plus coûteuse à mettre en œuvre et n'est utilisée que pour les matières premières fragiles dont les huiles essentielles ont une valeur plus élevée. En raison du processus d'extraction, il est possible de retrouver dans l'essence percolée des composés non volatils qui n'auraient pas été extraits par d'autres méthodes. Par conséquent, il est préférable de parler d'"essence de percolation" plutôt que d'huile essentielle dans ce cas.

III.2.3. Vapo-hydrodistillation

Il existe une variante intermédiaire entre l'hydrodistillation et l'entraînement à la vapeur, où la matière végétale et l'eau se trouvent dans la même enceinte, mais sans entrer en contact direct. Dans cette méthode, l'eau est chauffée dans la cuve, portée à ébullition, se transforme en vapeur, puis traverse la plante qui est placée sur une grille au-dessus de l'eau (Figure 7).

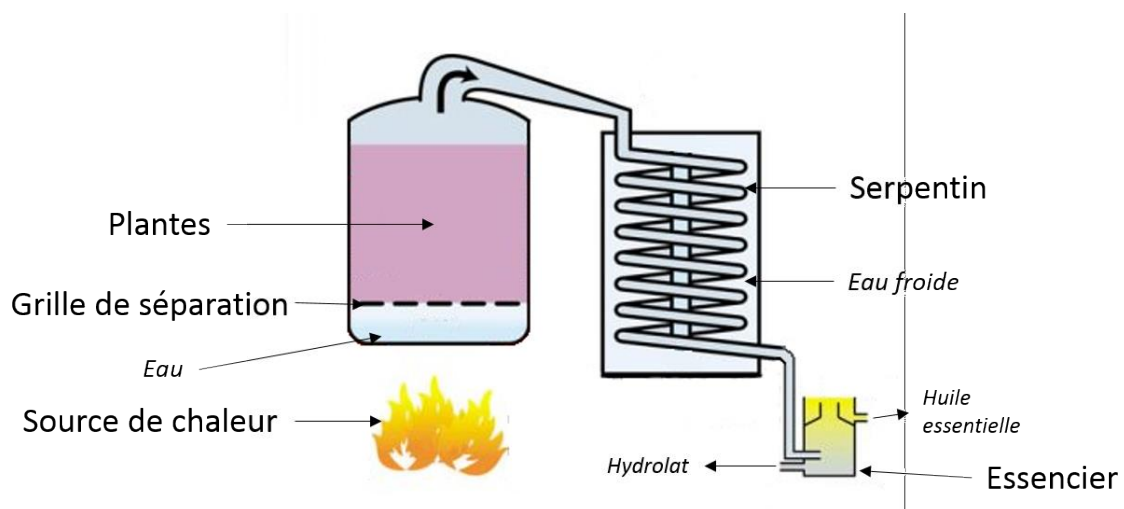


Figure 7 : Schéma d'une installation de vapo-hydrodistillation [11].

Le Tableau 3 présente un comparatif des avantages et inconvénients des trois méthodes présentées précédemment.

Tableau 3 : Intérêts et inconvénients des différents procédés de distillation [11]

	Hydrodistillation	Vapo- hydrodistillation	Entrainement à la vapeur

Type d'alambic	Simple, de faible coût, transportable et facilement installable dans les régions de production		De grande dimension pour Aug augmenter la cadence De distillation
Type de matériel végétal	Fleurs principalement, Inadapté si présence de composés saponifiables, hydrosoluble ou à température d'ébullition élevé	Plantes entières et feuillages	Tous sauf matériel finement broyé. Adapté pour les composés à point d'ébullition élevé
Conditions de diffusion	Bonnes, surtout si le matériel végétal est totalement immergé et mobile dans l'eau	Bonnes, si la vapeur circule de manière homogène dans la matière végétale	Bonnes, si la vapeur est légèrement mouillée et si elle diffuse de manière homogène dans le matériel végétal
Température dans l'alambic	Proche de 100°C, risque d'endommagement du matériel végétal par contact direct avec la cuve	Autour de 100°C	Modulable, peut dépasser 100°C
Vitesse de distillation	Relativement faible	Assez bonne	Elevée
Hydrolyse	Vitesse d'hydrolyse D'esters élevée	Moindre problème (contact plante/eau limité)	Faible en général
Rendement	Souvent relativement faible	Bon en l'absence demouillabilité importante de la plante	Bon si l'extraction est correctement conduite
Qualité de l'huile	Dépend des conditions	Toujours bonne	Bonne si l'extraction est correctement conduite

III.2.4. Distillation sèche

La distillation sèche est une méthode d'extraction des huiles essentielles qui est reconnue par la pharmacopée européenne. Bien qu'elle soit peu courante, cette technique implique un chauffage doux de la matière première, sans l'utilisation d'eau ou de solvant organique. Les composés volatils sont ensuite condensés et collectés. La température utilisée est inférieure à 100°C, ce qui permet de limiter les risques de dégradation associés

à la chaleur. L'absence d'eau contribue également à préserver les composés volatils de l'hydrolyse. Cette méthode permet d'obtenir une huile essentielle de haute qualité, qui conserve en grande partie les caractéristiques de l'essence présente dans la plante, mais le rendement obtenu est généralement très faible. Par conséquent, cette méthode convient particulièrement aux matières premières délicates et fragiles.

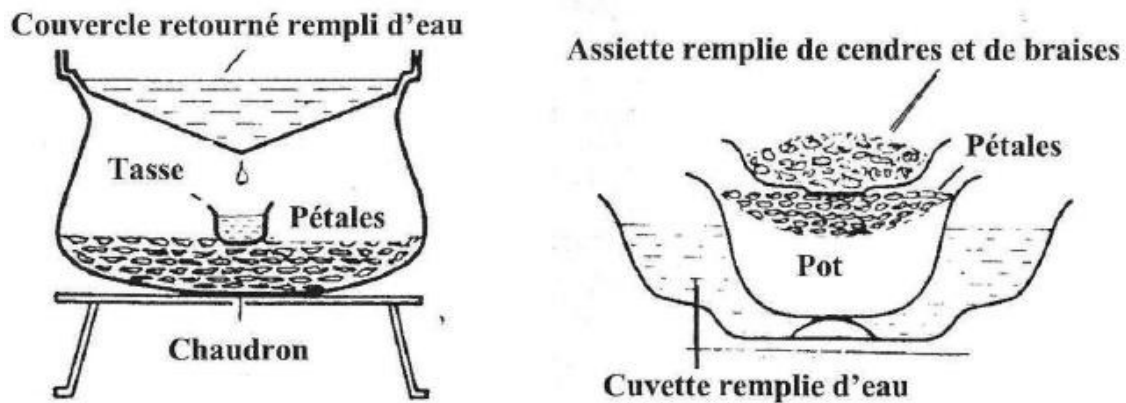


Figure 8 : Schéma d'une installation de distillation sèche [11].

III.2.5. Expression à froid

Le procédé d'extraction à froid, également appelé "expression à froid", est le troisième procédé d'extraction décrit par la pharmacopée européenne. Il est spécifiquement utilisé pour la production d'huiles essentielles à partir de fruits frais du genre Citrus, et il est considéré comme la méthode la plus simple.

L'expression à froid regroupe toutes les techniques mécaniques permettant d'extraire les huiles essentielles des fruits d'agrumes sans utiliser de chauffage. En général, l'objectif est de récupérer l'huile essentielle présente dans les glandes oléifères de l'épicarpe. Les méthodes utilisées varient, allant de l'abrasion simple de l'écorce du fruit au broyage complet de la peau. Étant donné que cette méthode est la plus respectueuse du produit d'origine, le terme "essence" est souvent utilisé pour désigner les huiles essentielles obtenues par ce procédé.

Avec l'évolution des méthodes de production, les essences d'agrumes sont devenues progressivement des sous-produits de la production de jus de fruits. Cela nécessite une

attention particulière quant à la qualité des huiles essentielles obtenues, mais cela a également considérablement réduit leur coût.

Ce procédé d'extraction s'est imposé car il permet d'obtenir une huile essentielle de qualité satisfaisante. En effet, les méthodes utilisant la chaleur et/ou l'eau, telles que la distillation, entraînent des modifications trop importantes de la composition et des caractéristiques organoleptiques de l'essence. Par exemple, certains aldéhydes aliphatiques présents dans les agrumes sont sensibles à la chaleur et donnent des composés malodorants lors de la distillation, ce qui rend l'huile essentielle difficilement exploitable. En revanche, l'expression à froid permet de préserver l'odeur caractéristique du fruit dans l'essence.

Les méthodes mécaniques permettent également de conserver des molécules apolaires et non volatiles qui sont généralement absentes des huiles essentielles produites par distillation, telles que les flavonoïdes, les stéroïdes, les acides gras, les furocoumarines substituées, etc. Certaines de ces molécules, comme les tocophérols, sont intéressantes car ce sont des antioxydants naturels qui favorisent la conservation de l'essence.

Cependant, lors de l'extraction des molécules apolaires non volatiles, il est malheureusement possible d'extraire également différents produits chimiques utilisés lors de la culture ou de la conservation des fruits.

III.2.6. Enfleurage et extraction par les graisses chaudes

L'enfleurage est une technique ancienne utilisée principalement dans la région de Grasse, en France, dans les années 1930, pour extraire les parfums des fleurs. Cette méthode d'extraction à froid implique l'utilisation de graisse. La graisse est étalée sur une surface plane, telle qu'un tamis ou un plateau, puis les fleurs sont délicatement déposées à la main sur la graisse. La graisse absorbe le parfum des fleurs en raison de son fort pouvoir d'absorption. Les fleurs sont ensuite remplacées progressivement jusqu'à ce que la graisse soit saturée. La graisse ainsi imprégnée est récupérée pour former une substance appelée "pommade". Cette pommade subit ensuite plusieurs traitements à l'alcool, ce qui permet un transfert progressif des substances odorantes de la graisse vers l'alcool. Par la suite,

l'alcool est éliminé pour obtenir ce qu'on appelle l'"absolu d'enfleurage". Il est important de noter que l'enfleurage ne vise pas à obtenir des huiles essentielles, mais plutôt des bases parfumées utilisées dans l'industrie de la parfumerie.

Cette méthode est particulièrement adaptée aux fleurs qui continuent à dégager leur parfum même après la cueillette, comme c'est le cas de la fleur de jasmin (*Jasminum grandiflorum* L.). Dans le cas du jasmin, les fleurs sont remplacées toutes les 24 heures pendant environ 70 jours.

L'enfleurage est une méthode qui demande un travail manuel intensif, nécessitant une main-d'œuvre expérimentée et qualifiée, ce qui la rend à la fois longue et coûteuse.

III.2.7. Extraction par les solvants

L'extraction par les graisses chaudes suit le même principe que l'enfleurage, à savoir l'extraction des substances odorantes des fleurs à l'aide de graisse qui est réutilisée jusqu'à saturation. Alors que dans ce cas, la matière végétale et la graisse sont chauffées à une température relativement basse pendant une à deux heures. Après filtration, la graisse est à nouveau chauffée avec des fleurs fraîches jusqu'à saturation. Ensuite, elle subit un traitement similaire à celui de l'enfleurage, mais cette fois-ci, on obtient ce qu'on appelle l'"absolue de macération". Cette méthode présente l'avantage de réduire le temps de contact entre les fleurs et la graisse, ainsi que la nécessité de main-d'œuvre.

L'extraction par les solvants est un procédé basé sur l'enfleurage, mais qui utilise des solvants non aqueux tels que l'hexane, les éthers de pétrole, les huiles, les gaz, etc. L'idéal est de choisir un solvant sélectif qui extrait les molécules aromatiques tout en laissant de côté les molécules indésirables telles que les pigments. Ce solvant doit avoir :

- Une température d'ébullition basse pour faciliter son élimination,
- Être chimiquement inerte vis-à-vis des substances à extraire,
- Ne pas être miscible avec l'eau pour faciliter la purification de l'extrait,
- Être peu coûteux,
- Ne présenter aucune contre-indication dans les domaines d'application de l'extrait,

- Ne pas être inflammable
- Présenter la toxicité la plus faible possible.

Aucun solvant ne satisfait pleinement à tous ces critères, mais l'hexane est le plus couramment utilisé. Les solvants organiques ont l'avantage d'extraire les parfums de manière très efficace par rapport à l'eau, mais ils entraînent également des composés non volatils.

Le principal inconvénient des solvants organiques est leur toxicité, ce qui limite les domaines d'application des extraits obtenus (appelés "concrètes"), notamment dans les domaines pharmaceutiques et agroalimentaires.

III.2.8. Extraction par le CO₂ supercritique

L'extraction par le CO₂ supercritique est une méthode spécifique qui utilise le CO₂ comme solvant et qui a émergé dans les années 1980. Cette technique exploite une propriété particulière du CO₂ : lorsqu'il est porté au-delà de son point critique (pression de 73,8 bars et température de 31,1°C), il se trouve dans un état intermédiaire entre le liquide et le gaz, ce qui lui confère un pouvoir d'extraction élevé des molécules aromatiques.

- Le principe général de cette méthode est le suivant : le CO₂, aux conditions de température et de pression requises, est amené à travers la matière végétale, où il extrait et volatilise les molécules aromatiques. Ensuite, le mélange passe par un séparateur où le CO₂ est détendu et vaporisé. Le CO₂ peut être éliminé ou recyclé, tandis que l'extrait se condense et est récupéré.

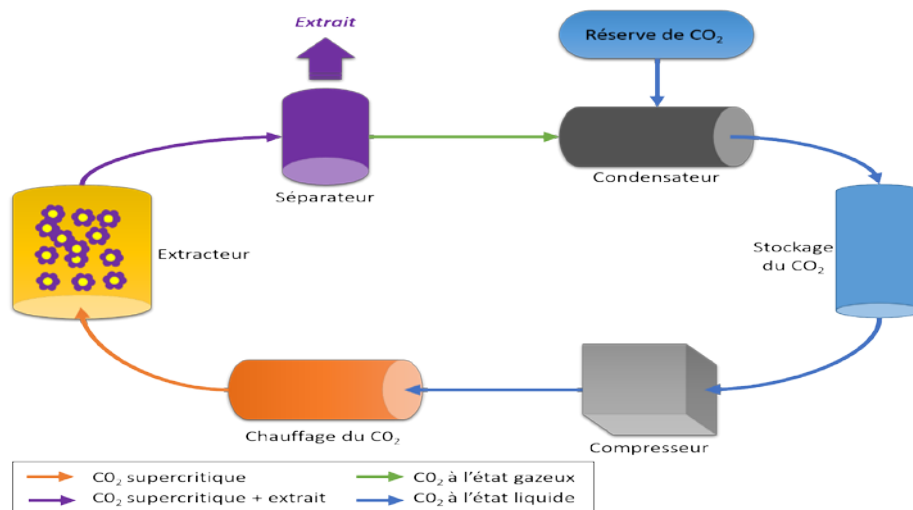


Figure 9 : Schéma simplifié d'un extracteur au CO₂ supercritique [11].

La méthode d'extraction par le CO₂ supercritique est en plein essor et présente de nombreux avantages qui lui promettent un bel avenir. Le CO₂ répond aux critères d'un solvant idéal évoqués précédemment : il est naturel, chimiquement inerte, ininflammable, peu toxique, sélectif et relativement abordable car il est abondant et son élimination ne laisse aucun résidu. De plus, cette méthode d'extraction se fait sans eau et à basse température, évitant ainsi les transformations chimiques indésirables, ce qui la rend encore plus attrayante.

Cette méthode présente également des inconvénients. Les installations nécessaires sont complexes et coûteuses, ce qui rend difficile l'accès à cette technique pour les petits producteurs. De plus, elle requiert une expertise technique. Elle est également énergivore, ce qui augmente les coûts de production.

Ce procédé offre également la possibilité de jouer sur la sélectivité d'extraction en ajustant les conditions de température et de pression. Ainsi, il est possible d'approcher la composition de l'extrait CO₂ de celle d'une huile essentielle, ou au contraire, de favoriser certaines molécules pour répondre aux exigences d'une utilisation spécifique. Ces variations de conditions ont également un impact significatif sur le rendement.

Il est important de noter que l'extrait obtenu par cette méthode diffère de l'huile essentielle en termes de composition chimique, tant au niveau de la concentration des

composés principaux que du nombre de composés présents. En effet, le CO₂ supercritique permet l'extraction d'un plus grand nombre de molécules. De plus, il favorise l'extraction des composés les plus volatils par rapport à l'hydrodistillation.

L'extraction par le CO₂ en phase supercritique permet donc d'obtenir un produit de qualité intéressante, pouvant se rapprocher de l'huile essentielle ou de l'essence d'origine. Cette méthode trouve déjà de nombreuses applications dans divers domaines.

III.2.9. Extractions assistées par les micro-ondes

L'utilisation des micro-ondes pour l'obtention des huiles essentielles a été introduite dans les années 1990 sous la forme d'une hydrodistillation assistée par les micro-ondes et sous vide. Cette méthode consiste à placer la matière végétale dans une enceinte close et à la chauffer à l'aide des micro-ondes. Les molécules volatiles sont alors entraînées par la vapeur d'eau produite à partir de l'eau présente dans la plante. La vapeur est ensuite récupérée et traitée de la même manière que dans les méthodes traditionnelles. Cette approche a permis de réduire considérablement le temps d'extraction, et donc l'énergie nécessaire, de 5 à 10 fois selon les plantes.

Par exemple, il faut désormais quinze minutes pour traiter 2 kg de menthe poivrée (*Mentha x piperita* L.) avec un rendement de 1%, contre deux heures pour obtenir un résultat similaire par hydrodistillation [12].

Actuellement, la tendance est à l'hybridation des techniques, avec l'émergence de méthodes d'extraction assistées par micro-ondes. Dans le cas de l'hydrodistillation, le ballon contenant le mélange d'eau et de matière végétale est placé dans l'enceinte de l'appareil à micro-ondes. Cela permet une réduction significative du temps d'extraction et une légère augmentation du rendement d'extraction, sans différence significative dans la composition chimique de l'huile essentielle. La réduction du temps de contact avec l'eau et la baisse de la température de chauffage contribuent à mieux préserver les composés oxygénés de l'essence.

L'utilisation des micro-ondes répond également à une demande croissante en matière de technologies "vertes" dans l'extraction des huiles essentielles. En effet, cette technique n'utilise pas de solvants chimiques et elle est économe en énergie, en temps et en investissement. Étant donné que la qualité de l'huile essentielle est préservée, elle constitue une bonne alternative aux méthodes traditionnelles.

III.3. Transformations chimiques au cours de l'extraction

Lors de l'extraction des huiles essentielles, il est important de prendre en compte les transformations chimiques qui peuvent se produire et affecter la composition de l'huile obtenue. Certains composants fragiles des plantes sont sensibles à divers facteurs tels que l'humidité, la chaleur, la lumière, l'oxygène et les agents microbiens. Pour obtenir une huile essentielle de qualité, il est essentiel de maîtriser les différentes étapes d'extraction afin de limiter ces transformations.

Les terpénoïdes, en général, ont tendance à être volatils et sensibles à la chaleur, ce qui favorise les réactions d'oxydation et d'hydrolyse. Les monoterpènes (mono et bicycliques), les alcools monoterpéniques, les acides aminés soufrés et les oxydes sesquiterpéniques sont particulièrement sensibles à ces transformations. Les différentes méthodes d'extraction exposent les composants végétaux à des modifications variables, ce qui les rend plus ou moins adaptées à chaque type d'huile essentielle. Par exemple, pour les agrumes, l'extraction à froid est souvent préférée à l'hydrodistillation, car cette dernière peut altérer les caractéristiques organoleptiques de l'huile, notamment son goût et son odeur.

Les conditions pendant la distillation peuvent varier, notamment la quantité d'eau, la température et le pH, qui peuvent avoir des valeurs comprises entre 4 et 7. On sait que plus l'exposition à la chaleur et à l'humidité est longue et plus le pH est acide, plus l'huile essentielle subit de transformations. Des réactions se produisent entre l'eau et certaines molécules, entraînant l'hydrolyse des esters pour former des alcools et des acides organiques. Ces acides catalysent ensuite des réactions de cyclisation et de déshydratation.

Étant donné que les réactions d'hydrolyse dépendent du temps, il est important de mener des extractions courtes pour préserver les esters qui sont présents en grande quantité ou qui présentent un intérêt particulier dans certaines huiles essentielles.

Par exemple, l'acétate de linalyle présent en grande quantité dans l'huile essentielle de lavande vraie (*Lavandula angustifolia* Mill.) s'hydrolyse pendant la distillation, ce qui conduit à une diminution de sa proportion au profit du linalol. Cela entraîne des modifications du parfum et des propriétés thérapeutiques de l'huile essentielle, qui peut devenir moins antispasmodique mais plus antiseptique [12].

Dans les plantes, certains composés terpéniques se trouvent sous forme de glycosides conjugués. Ces complexes de poids moléculaire élevé ne peuvent généralement pas être entraînés à l'état libre par la vapeur. Cependant, la distillation crée un environnement propice à certaines réactions chimiques ou à des fractionnements enzymatiques, ce qui permet de libérer les molécules aromatiques et de les retrouver dans l'huile essentielle après distillation.

III.4. Critères de qualité d'une huile essentielle

La production d'une huile essentielle de qualité est un processus complexe qui implique de nombreuses étapes, de la plante jusqu'à son utilisation finale. Il est essentiel de prendre en compte ces différentes étapes pour garantir la meilleure qualité possible de l'huile essentielle. Les critères de qualité que nous allons examiner en détail permettent d'identifier les aspects clés de la production d'une huile essentielle de haute qualité. Cela souligne la nécessité d'une approche rigoureuse et méticuleuse tout au long du processus pour obtenir des résultats optimaux.

III.4.1. Relatifs à la matière première végétale

- Dénomination botanique

Il est essentiel d'utiliser la dénomination botanique précise lors de l'identification des plantes pour l'extraction des huiles essentielles. Cela implique de donner le nom de la

famille, du genre, de l'espèce et du botaniste descripteur. Par exemple, pour la lavande vraie, on utilise la dénomination *Lavandula angustifolia* Mill. Dans le cas des plantes hybrides, qui résultent du croisement de deux espèces, certains hybrides ont leur propre dénomination, comme la menthe poivrée (*Mentha x piperita* L.), qui est un hybride de la menthe aquatique (*Mentha aquatica* L.) et de la menthe verte (*Mentha spicata* L.).

L'utilisation de la dénomination scientifique est essentielle pour éviter toute confusion et ses conséquences potentiellement graves. Certains risques de confusion peuvent survenir en raison des dénominations communes similaires.

Il est impératif de vérifier l'identification de la plante avant d'extraire l'huile essentielle pour s'assurer qu'elle appartient bien à l'espèce désirée. Cela nécessite une étude approfondie de la drogue végétale, fraîche ou séchée, à travers des analyses macroscopiques et microscopiques. Cette vérification peut être réalisée grâce à un certificat du fournisseur ou en effectuant des tests spécifiques décrits dans les références.

Les caractéristiques botaniques macroscopiques de la drogue végétale sont étudiées, notamment sa morphologie, sa couleur, sa saveur, ainsi que son degré de pureté et les éventuelles dégradations. Ensuite, les caractéristiques botaniques microscopiques de la matière végétale sont analysées pour identifier les caractères spécifiques de l'espèce et détecter d'éventuels éléments étrangers. Des tests chromatographiques tels que la chromatographie sur couche mince (CCM) ou la chromatographie en phase gazeuse (CPG) peuvent être réalisés pour comparer le chromatogramme de l'extrait avec des substances de référence ou un profil chromatographique. Cela permet également de déterminer le chémotype précis en identifiant les constituants majeurs de l'huile essentielle.

D'autres tests de qualité peuvent être effectués, tels que la recherche de réactions colorées caractéristiques, la détection de la présence de pesticides, de métaux lourds ou de contaminations microbiennes ou fongiques, conformément aux critères définis dans les références.

On étudie dans un premier temps les caractères botaniques macroscopiques de la drogue végétale. L'ensemble des critères de la plante sont étudiés : morphologie, couleur, saveur ainsi que le degré de pureté et éventuelles dégradations. On analyse ensuite les caractères botaniques microscopiques de la matière première végétale, ce qui permet de rechercher et d'identifier les caractères spécifiques ou dominants de l'espèce considérée. Cet examen permet également de repérer des éléments étrangers. On réalise une chromatographie sur couche mince (CCM) ou chromatographie en phase gazeuse (CPG) de l'extrait. Le chromatogramme est comparé à un témoin contenant au moins deux substances de référence dans le cas d'une CCM ou à un profil chromatographique dans le cas d'une CPG. C'est également lors de cette étape que la précision du chémotype sera faite, après identification du ou des constituants majoritaires de l'huile essentielle.

Lorsqu'il en existe, des réactions colorées caractéristiques seront réalisées. D'autres essais ayant trait à la qualité du produit figurent également à la liste des tests à réaliser (présence de pesticides ou de métaux lourds, contaminations microbiennes ou fongiques, etc.).

La figure 10 montre différents éléments de reconnaissance pour la menthe poivrée (*Mentha x piperita* L.)

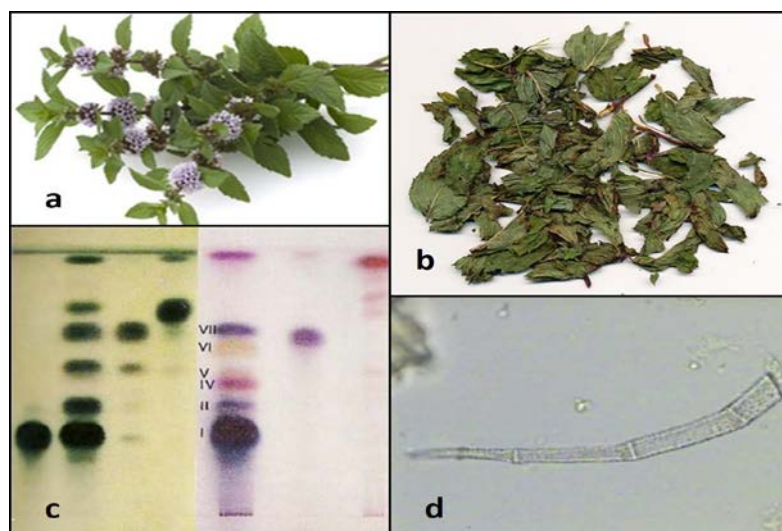


Figure 10 : *Mentha x piperita* L. : plante fraîche (a), feuilles séchées (b), chromatogrammesur couche mince (c), poil tecteur au microscope optique (d) [13].

- Conditions de production

Les conditions de production jouent un rôle crucial dans la qualité des huiles essentielles, et il est important que les plantes soient aussi saines que possible. On distingue tout d'abord les plantes cultivées des plantes sauvages (cueillette). Dans les deux cas, il est essentiel que le producteur veille à la qualité de l'environnement dans lequel la plante pousse, en évitant la pollution, en utilisant des pesticides de manière raisonnée et en préservant les ressources naturelles et l'habitat. Il est important de fournir autant d'informations que possible sur le lieu et les conditions de récolte, telles que l'altitude, la nature du sol, la saison et la période du cycle végétatif de la plante (par exemple, la floraison pour les plantes de la famille des Lamiacées), les conditions de stockage et les éventuels traitements appliqués à la plante avant l'extraction (séchage, fragmentation). Dans de nombreux cas, les plantes ne sont pas utilisées à l'état frais, et de bonnes pratiques de séchage sont donc indispensables pour préserver la qualité de la drogue végétale en évitant les dégradations enzymatiques. Le séchage doit être rapide et réalisé sans une chaleur excessive.

La connaissance de l'origine géographique de la plante et, par conséquent, de l'huile essentielle qui en est extraite, est essentielle pour assurer la traçabilité et prévenir toute fraude éventuelle, intentionnelle ou non. Les bonnes pratiques agricoles exigent la production d'une matière première végétale exempte d'impuretés telles que la terre, la poussière, les souillures, les infections fongiques, les contaminations animales ou les pourritures.

La partie de la plante utilisée est également un élément important à prendre en compte. L'identification précise de la plante est nécessaire, mais il est également crucial de connaître la partie de la plante ou l'organe producteur utilisé.

Les huiles essentielles sont produites par des cellules sécrétrices, isolées ou regroupées dans différentes structures, et elles sont généralement stockées à proximité de ces cellules.

Ces cellules ne sont pas uniformément réparties dans la plante. Ainsi, la partie de la plante utilisée pour l'extraction de l'huile essentielle affecte à la fois le rendement et la composition de l'extrait. Il est donc important de préciser quelle partie de la plante est à l'origine de l'huile essentielle.

Par exemple, le bigaradier (*Citrus aurantium* L.) illustre bien ces différences [14]:

- Les feuilles et les jeunes fruits donnent, par distillation, l'huile essentielle de petit grain bigarade, qui est riche en acétate de linalyle.
- Les fleurs fournissent, par distillation, l'huile essentielle de néroli bigarade, qui contient principalement du linalol.
- L'écorce des fruits donne, par simple expression à froid, une essence riche en limonène.

- Chémotype

Pour une même espèce, une même partie de plante utilisée et des individus morphologiquement identiques, il est possible d'obtenir des huiles essentielles de compositions différentes, sans constituer de sous-espèce ou de variétés nouvelles. Il s'agit des chémotypes ou race chimique, qu'il faut systématiquement identifier et signaler. Ce chémotype, généralement désigné par son ou ses constituants principaux, est signalé par les lettres « ct ». Cette identification est d'autant plus importante qu'une même espèce peut donner des huiles essentielles aux propriétés très différentes mais dont la toxicité est également très variable.

III.4.2. Relatifs à l'huile essentielle

- Méthode d'extraction

Le choix de la méthode d'extraction des huiles essentielles dépend principalement de la plante, de son état et de ses caractéristiques. Cependant, d'autres facteurs tels que le coût de la technique d'extraction et les modifications indésirables de la qualité de l'huile essentielle peuvent également influencer ce choix.

La méthode d'extraction sélectionnée aura un impact sur de nombreuses caractéristiques de l'huile essentielle, telles que sa viscosité, sa couleur, sa solubilité, sa volatilité, ainsi que son enrichissement ou son appauvrissement en certains constituants. Il est donc crucial pour le producteur d'huile essentielle de choisir une méthode qui garantisse à la fois une grande qualité de l'huile et des coûts de production raisonnables.

En ce qui concerne les caractéristiques physico-chimiques, différents tests sont effectués pour évaluer la qualité des huiles essentielles et détecter d'éventuelles impuretés. Par exemple, la capacité d'une huile essentielle à dévier la lumière polarisée peut être un indicateur de sa pureté. Chaque huile possède également son propre indice de réfraction, ce qui est un autre critère d'étude.

Selon les normes en vigueur (AFNOR, ISO, Pharmacopée Européenne ou Française), d'autres tests peuvent être requis, tels que :

- Des examens organoleptiques (aspect, viscosité, couleur, odeur, goût).
- Des examens physiques (densité, indice de réfraction, pouvoir rotatoire, miscibilité avec l'éthanol à 80%, inflammabilité).
- Des examens chimiques (indice d'acide, détermination d'ester avant et après acétylation, durée de saponification).

L'identification des constituants d'une huile essentielle et la détection de possibles falsifications peuvent être réalisées par différentes techniques, comme la chromatographie sur couche mince ou en phase gazeuse.

Le profil chromatographique (par CPG) d'une huile essentielle, obtenu dans des conditions spécifiques, permet d'estimer de manière reproductible la concentration de certains composés caractéristiques de l'échantillon par la méthode de normalisation. Cette estimation basée sur les pourcentages relatifs des aires des pics des constituants ne constitue pas un dosage précis de chaque constituant.

Pour obtenir la composition exacte d'un échantillon, la méthode d'étalonnage, qui implique l'injection d'une solution de référence contenant chacun des constituants à une concentration connue, doit être utilisée.

- Conditions de conservation et de stockage

Le stockage des huiles essentielles est une étape critique qui ne doit pas être négligée. Ces produits sont relativement instables et peuvent subir des transformations importantes

pendant le stockage si les conditions ne sont pas optimales, surtout lorsqu'il s'agit d'un stockage à long terme.

Les risques de dégradation sont nombreux et peuvent être facilement identifiés en étudiant les caractéristiques organoleptiques et physico-chimiques de l'huile essentielle. Les conséquences de ces dégradations peuvent varier considérablement, car de nombreuses molécules se transforment, entraînant des changements progressifs dans le profil chromatographique, les propriétés et le degré de toxicité du produit.

Chaque intervenant de la chaîne, du producteur au revendeur, voire à l'acheteur lui-même, doit être conscient de l'importance des conditions de conservation de l'huile essentielle et adapter ses pratiques en conséquence.

Pour assurer une conservation adéquate, une huile essentielle doit être stockée dans un récipient propre et sec en aluminium vernissé, en acier inoxydable ou en verre teinté afin de la protéger de la lumière. Le récipient doit être hermétique et limiter le contact avec l'air (il est possible d'utiliser un gaz inerte ou de l'azote), d'où l'importance de remplir complètement le flacon avec l'huile essentielle. Le stockage doit être effectué à l'abri de la lumière et de la chaleur. Ces exigences s'appliquent aussi bien au stockage chez le producteur qu'à l'emballage utilisé pour la vente au détail.

L'utilisation de contenants en plastique, parfois observée, doit être évitée en raison du risque d'interactions entre le produit et le matériau plastique.

III.4.3. Relatifs à la Pharmacopée Européenne

La neuvième édition de la Pharmacopée Européenne présente une monographie générale des huiles essentielles qui est considérée comme une référence. Cette monographie contient les informations suivantes :

- Elle décrit les méthodes d'extraction reconnues, telles que l'entraînement à la vapeur d'eau, la distillation sèche et l'expression à froid.
- Elle mentionne également la possibilité d'ajouter un antioxydant approprié à

l'huile essentielle si nécessaire.

- Elle spécifie les traitements ultérieurs auxquels l'huile essentielle peut être soumise, tels que la déterpénation, la déterpénation et la désesquiterpénation, la rectification ou l'élimination de certaines substances. La caractérisation de l'aspect et de l'odeur de l'huile essentielle est également soulignée.
- Elle recommande l'identification préférentielle des huiles essentielles par chromatographie en phase gazeuse, et à défaut, par d'autres tests tels que la chromatographie sur couche mince.
- Elle énumère les essais généraux à effectuer, tels que la mesure de la densité, de l'indice de réfraction, de l'angle de rotation, ainsi que les essais spécifiques pour les huiles grasses et les huiles essentielles résinifiées.
- Elle mentionne également d'autres essais supplémentaires qui peuvent être nécessaires, tels que la détermination du point de solidification, de l'indice d'acide, De l'indice de peroxyde, la recherche d'esters étrangers, de résidus d'évaporation, d'eau, de solubilité dans l'alcool et de falsifications éventuelles.
- Elle précise les conditions de conservation à respecter, notamment l'utilisation d'un récipient hermétique, rempli complètement et stocké à l'abri de la lumière.
- Elle établit les règles relatives à l'étiquetage des huiles essentielles, qui doivent inclure le nom scientifique de la plante d'origine, le type d'huile essentielle et/ou son chémotype, la méthode de production, le nom et la concentration éventuelle de l'antioxydant ajouté, ainsi que les étapes de traitement supplémentaires, le cas échéant.

III.4.4. Critères de qualité « économique »

Les utilisateurs d'huiles essentielles et de plantes aromatiques ont des critères de qualité spécifiques, adaptés à leurs domaines d'application respectifs. Par exemple, en aromathérapie, l'accent est mis sur la teneur en essence de la plante et sa composition chimique. Les parfumeurs, quant à eux, recherchent la reproductibilité et la fidélité du produit en termes d'odeur spécifique. Pour les plantes utilisées comme épices ou herbes

culinaires, des critères tels que le rendement en masse végétale, la résistance aux maladies, l'aspect esthétique ainsi que des propriétés organoleptiques de qualité immédiate sont importants.

IV. Composition chimique

La composition chimique d'une huile essentielle est influencée par de nombreux facteurs. Certains sont liés aux processus d'extraction, mais la composition chimique dépend principalement de l'essence produite par la plante, qui est à son tour influencée par des facteurs environnementaux et surtout par le patrimoine génétique de la plante.

La présence ou l'absence d'un constituant chimique à différentes étapes de croissance est entièrement déterminée par le patrimoine génétique de la plante, tandis que sa concentration est influencée à la fois par la génétique et les facteurs environnementaux.

Les huiles essentielles peuvent contenir plusieurs milliers de molécules différentes. Une seule huile essentielle peut contenir des dizaines, voire des centaines, de composés chimiques différents, dans des proportions variables. À l'inverse, certaines huiles essentielles peuvent être composées principalement d'une seule molécule, reléguant les autres composants à un rôle mineur. Par exemple, la gaulthérie couchée (*Gaultheria procumbens* L.) contient jusqu'à plus de 99% de salicylate de méthyle.

Il est important de souligner que la composition chimique de l'huile essentielle est le reflet de celle de l'essence extraite de la plante à travers le processus d'extraction. Ainsi, elle contient à la fois les molécules synthétisées naturellement par la plante et les produits de leur réarrangement pendant l'extraction.

IV.1. Matériel et méthodes d'étude

Les huiles essentielles sont composées d'un grand nombre de composés différents, allant de quelques dizaines à plusieurs centaines. Étant donné que les propriétés des huiles essentielles sont étroitement liées à leur composition chimique, il est crucial de les connaître le plus précisément possible. Grâce aux progrès des méthodes analytiques, il est

maintenant possible d'identifier de manière relativement simple et rapide de nombreux composants, ce qui permet de contrôler si un échantillon possède le profil chimique attendu et d'étudier les relations entre la structure des composés et leur activité au sein de l'huile essentielle.

Il existe plusieurs méthodes analytiques adaptées à l'étude de la composition chimique des échantillons d'huiles essentielles, mais certaines sont plus appropriées pour la séparation des composés aromatiques extraits. Dans la pharmacopée française, neuf monographies d'huiles essentielles recommandent toutes la réalisation d'une chromatographie en phase gazeuse (CPG) avec un détecteur à ionisation de flamme, ainsi que d'une chromatographie sur couche mince (CCM) pour le contrôle des échantillons.

La chromatographie en phase gazeuse (CPG) est devenue la méthode de référence dans l'étude des huiles essentielles. Toutefois, la chromatographie sur couche mince (CCM) a également un intérêt

IV.1.1. Chromatographie en phase gazeuse (CPG)

La chromatographie en phase gazeuse (CPG) est une méthode d'analyse qui permet de séparer les composés gazeux ou vaporisables sans les décomposer. Elle est particulièrement adaptée à l'examen de mélanges complexes contenant des constituants de natures et de volatilités différentes, ce qui en fait la méthode préférée pour l'analyse des composés volatils présents dans les extraits aromatiques.

La CPG est devenue indispensable en raison de son coût raisonnable, de sa capacité à être automatisée, de sa robustesse, de sa reproductibilité et de sa flexibilité. Cette méthode repose sur le principe de la chromatographie de partage, où une phase stationnaire sous forme de liquide non volatil est fixée sur un support inerte, et une phase mobile constituée d'un gaz inerte (comme H₂, N₂, He, Ar...) est utilisée pour l'élution des composés. La séparation se fait en fonction de l'affinité des composés volatils pour chacune des deux phases.

La CPG permet également d'effectuer une analyse quantitative de la composition chimique d'un échantillon. Différentes méthodes sont utilisées à cet effet, telles que la normalisation interne, l'étalonnage externe, l'étalonnage interne et la méthode des ajouts dosés. Le choix de la méthode dépend principalement de la rapidité, de la simplicité et de la précision recherchée dans l'analyse. D'autres paramètres peuvent également être pris en compte, tels que la quantité d'échantillon disponible ou la disponibilité d'un étalon adéquat en termes de quantité et de qualité.

IV.1.2. Chromatographie sur couche mince (CCM)

La chromatographie sur couche mince (CCM) est une méthode analytique complémentaire à la CPG, appréciée pour sa simplicité et sa flexibilité. Elle offre l'avantage de permettre une analyse sans chauffage, évitant ainsi les éventuelles dégradations des échantillons.

Dans la CCM, une fine couche d'absorbant (comme la silice) est déposée sur une plaque en verre ou en aluminium, servant de support. L'échantillon est déposé sur cette couche, qui agit comme une phase stationnaire. La partie inférieure de la plaque est plongée dans un solvant (phase mobile), qui remonte par capillarité le long de la plaque, entraînant les constituants de l'échantillon à des vitesses différentes. En traitant la plaque séchée avec un révélateur, on peut mettre en évidence les composés séparés, formant ainsi de petites taches visibles à l'œil nu ou sous une lumière ultraviolette. La chromatographie sur couche mince offre une grande variété de révélateurs, permettant la détection d'un grand nombre de produits dans les échantillons.

Aujourd'hui, la méthode s'est améliorée et on parle de chromatographie sur couche mince de haute performance (HPTLC). Son automatisation la rend rapide, reproductible et reproductible. Elle permet désormais des études qualitatives et quantitatives, ainsi que la purification de composés. Bien que sa résolution reste inférieure à celle de la CPG, son adaptation aux technologies actuelles a considérablement augmenté sa performance.

La CCM, ainsi que sa version améliorée, la HPTLC, sont des méthodes particulièrement adaptées aux huiles essentielles, notamment pour la comparaison de deux huiles provenant de différentes sources ou pour détecter rapidement une éventuelle adultération.

IV.2. Les familles chimiques des huiles essentielles

Les plantes, tout comme les autres organismes vivants, utilisent des molécules organiques pour leur survie et leur croissance. Ces molécules leur fournissent l'énergie nécessaire et les matériaux nécessaires à leur métabolisme.

On distingue deux types de métabolisme : le métabolisme primaire et le métabolisme secondaire.

- **Le métabolisme primaire** est universel chez les animaux et les plantes, et fournit les éléments de base essentiels à la vie, tels que les protéines, les glucides, les lipides et les acides nucléiques. Ces composés constituent également la base du métabolisme secondaire. Bien qu'il y ait parfois des produits de dégradation des métabolites primaires, ces molécules ont peu d'intérêt dans l'étude des huiles essentielles.
- **Le métabolisme secondaire** produit des molécules avec une distribution plus limitée, qui servent à l'adaptation de la plante à son environnement. Ce sont ces composés qui se retrouvent dans les huiles essentielles. Les composés organiques volatils (COV) représentent environ 1% des métabolites secondaires. On estime qu'il existe environ mille COV différents fréquemment présents dans les huiles essentielles.

Les composants des huiles essentielles sont généralement regroupés en trois catégories correspondant à leurs voies de synthèse : les terpénoïdes (les plus nombreux), les phénylpropanoïdes et les dérivés des acides gras. Chacune de ces voies de synthèse utilise des précurseurs différents [15].

Les constituants des huiles essentielles comprennent des hydrocarbures et leurs dérivés oxygénés, ainsi que des composés contenant de l'azote et du soufre, ces derniers étant souvent spécifiques à certaines espèces ou genres.

IV.2.1. Composés terpéniques

Les terpénoïdes sont une vaste classe de composés naturels. Leur structure varie considérablement, mais ils sont tous formés par l'assemblage d'unités isopréniques dérivées du métabolisme du glucose. Ils sont classés en fonction du nombre d'unités isoprène (molécules pentacarbonées) qui les composent : hémiterpènes (C_5), monoterpènes (C_{10}), sesquiterpènes (C_{15}), diterpènes (C_{20}), sesterpènes (C_{25}), triterpènes (C_{30}), caroténoïdes (C_{40}) et polyisoprènes (C_n).

En général, seules les molécules de poids moléculaire faible, c'est-à-dire celles comprenant de 10 à 20 atomes de carbone, sont présentes dans les huiles essentielles. Les composés plus lourds sont difficiles à extraire.

Il existe plus de 30 000 terpènes différents, ce qui en fait le plus grand groupe de produits naturels connus. Le terme "terpène" trouve son origine dans la térébenthine, une oléorésine issue notamment des plantes du genre *Pinus* et qui contient certains hydrocarbures initialement appelés "terpènes", terme qui a ensuite été conservé pour désigner les molécules de structures similaires.

Ce groupe de composés comprend des molécules aux structures très variées, allant de simples chaînes carbonées à des agencements cycliques complexes, et ayant des rôles tout aussi diversifiés. Cependant, toutes ces molécules ont en commun le fait d'être issues de la condensation d'unités isopréniques (C_5H_8). Les monoterpènes sont de loin les plus représentés, suivis des sesquiterpènes.

IV.2.1.1. Les Monoterpènes C_{10}

Les molécules les plus couramment présentes dans les huiles essentielles sont les monoterpènes, qui sont composés de 10 atomes de carbone. Bien que leur contribution

aux huiles essentielles soit relativement faible en termes de concentration, ils sont caractérisés par leur volatilité élevée et leur légère odeur.

Les monoterpènes agissent comme des toniques généraux et sont également de puissants antiseptiques, particulièrement lorsqu'ils sont utilisés en diffusion atmosphérique. Ils possèdent également des propriétés expectorantes et décongestionnantes respiratoires. Certains d'entre eux ont une action stimulante sur les sécrétions digestives, comme le limonène, que l'on retrouve dans de nombreuses huiles essentielles issues de plantes traditionnellement utilisées comme condiments.

Certains monoterpènes, tels que l' α -pinène et le β -pinène, sont présents dans de nombreuses huiles essentielles et sont connus pour leurs propriétés lymphotoniques et décongestionnantes. Le p-cymène a également démontré un effet antalgique intéressant par voie cutanée, ce qui peut être utile pour soulager des douleurs localisées. Le limonène, qui est le terpène le plus répandu, stimule la microcirculation digestive.

Il est important d'être prudent lors de l'utilisation d'huiles essentielles contenant des monoterpènes en raison de leur potentiel d'irritation cutanée. L'application directe sur la peau, ainsi que sur les muqueuses, peut entraîner des rougeurs, des sensations de brûlure et des démangeaisons. Il est donc recommandé de diluer ces huiles essentielles dans une huile végétale et de ne pas les utiliser de manière prolongée.

Propriétés : Les monoterpènes présentent des propriétés bactéricides, antifongiques, antivirales et antiseptiques atmosphériques.

Toxicité : ils peuvent être toxiques pour le système nerveux à fortes doses et en cas d'utilisation prolongée. Ils présentent également un risque d'épilepsie.

Exemples de monoterpènes sont : le limonène, l'alpha-pinène, le bêta-pinène, le gamma-terpinène et le sabinène.

IV.2.1.2. Les Carbures sesquiterpéniques C₁₅

Les sesquiterpènes sont des composés composés de 15 atomes de carbone, ils sont moins fréquents dans les huiles essentielles. Ils se caractérisent par leur odeur puissante.

Certains sesquiterpènes polyinsaturés présentent une activité anti-inflammatoire avérée, ce qui se traduit par un effet anti-hyper- α -2-globulinémie. Le β -caryophyllène est le sesquiterpène le plus couramment rencontré, notamment chez les plantes de la famille des lamiacées.

Le chamazulène est un autre sesquiterpène qui possède de puissantes propriétés antihistaminiques, ce qui le rend utile dans le traitement des allergies.

Les huiles essentielles contenant du chamazulène sont utilisées pour traiter divers problèmes cutanés tels que l'acné rosacée, ainsi que comme antihistaminiques chez certains asthmatiques.

Les sesquiterpènes présents dans les huiles essentielles peuvent avoir des propriétés irritantes, bien que moins prononcées que celles de leurs homologues monoterpéniques. Il est généralement recommandé de les utiliser dilués pour minimiser les risques d'irritation cutanée.

IV.2.1.3. Les Carbures terpéniques lourds (C₂₀ à C₄₀)

Les diterpènes sont des composés relativement peu courants dans les plantes, et leur présence dans les huiles essentielles peut varier en raison de leur poids moléculaire élevé, ce qui rend leur extraction plus complexe.

Propriétés : elles ont des propriétés antimicrobiennes, anti-inflammatoires, antioxydantes et expectorantes.

Exemples de diterpènes : cembrène, le sclarène, le stémarène et le taxadiène.

IV.2.2. Les composés oxygénés

IV.2.2.1. Aldéhydes

Le nom se termine par « al ».

Leurs vertus thérapeutiques :

- Anti-inflammatoires local
- Calmants et apaisants, ils agissent directement sur le système nerveux
- Ils augmentent localement le flux sanguin
- Antiseptiques aériens
- Antimycosiques
- Anti infectieux puissants
- Hypotensives

Toxicité : A forte dose, ils peuvent être irritants pour la peau et les muqueuses.

Exemples d'aldéhydes :

- Citral : dans l'oranger bigaradier
- Citronellal : dans l'eucalyptus citronné.

IV.2.2.2. Cétones

Leur nom se termine par « one ».

Leurs vertus thérapeutiques :

- Régénérants pour la peau
- Mucolytiques
- Lipolytiques : action sur la cellulite et l'obésité
- Antihématomes
- Antivirales
- Antifongiques
- Antiparasitaires
- Stimulantes système nerveux central

Toxicité : En cas de dosage répété et élevé, action neurotoxique, abortive, stupéfiante et épileptisante.

Exemples de cétones présentes dans certaines plantes :

- La menthone se trouve dans la menthe poivrée (15 à 20%) et la menthe des champs (17 à 22%).
- La fenchone est présente dans la lavande stoechade (45 à 50%).
- La pulégone se retrouve en grande quantité dans la menthe polio (80%).
- La bornéone est présente dans le romarin officinal et 1,8 cinéole (5 à 15%), le romarin à verbénone (15%), la lavande aspic (15%) et le lavandin super (5%).
- La carvone est présente dans la menthe verte (50%), le carvi (45 à 65%) et l'aneth (3 à 30%).
- La verbénone se trouve dans le romarin officinal à verbénone (15 à 37%).

IV.2.2.3. Alcools et phénols

Leur nom se termine par « ol ».

Les molécules à fonction alcool sont les abondantes après les terpènes.

Ce sont de très puissants anti-infectieux par neutralisation directe des agents pathogènes mais également parce qu'ils corrigent les terrains favorables à leur développement et qu'ils stimulent l'immunité.

Il existe trois catégories d'alcools présents dans les huiles essentielles :

- **Alcools monoterpéniques ou monoterpénols** : ce sont les alcools les plus efficaces contre les infections. Ils ont un large spectre d'action, notamment en tant que bactéricides, fongicides, parasitocides et virucides. De plus, ils sont d'excellents toniques généraux et toniques nerveux. Parmi les exemples, on trouve le thuyanol 4 dans le thym vulgaire à thuyanol 4, le linalol dans le thym vulgaire à linalol, le menthol dans la menthe poivrée et le citronnellol dans le géranium rosat.
- **Alcools sesquiterpéniques ou sesquiterpénols** : ils agissent comme toniques généraux et stimulants, cardiotoniques, décongestionnants veineux et lymphatiques, ainsi que comme immunostimulants de type hormonal. Cependant,

ils ont une activité anti-infectieuse moins prononcée que les alcools monoterpéniques. Parmi les exemples, on trouve le carotol dans la carotte, le santalol dans le santal, le viridiflorol dans le niaouli et le salviol dans la sauge sclarée.

- **Alcools diterpéniques ou diterpénols** : ils sont reconnus pour leur activité anti-infectieuse, antivirale, antiseptique, bactéricide, diurétique, immunostimulante et cardiotonique. Les molécules d'alcool ne présentent aucune contre-indication ni toxicité et sont même recommandées chez les enfants. Le sclareol dans la sauge sclarée est un exemple d'alcool diterpénique.

- **Phénols**

Les phénols sont des anti-infectieux très puissants. Antibactériens à large spectre (une large majorité des bactéries pathogènes y sont sensibles), ils sont également virucides, fongicides antiparasitaires. Leur action sur les germes se fait par désorganisation des lipides de leur membrane mais également par dénaturation des protéines. Leur action antibactérienne est complétée par leur capacité à stimuler l'immunité. Ils sont également hyperthermisants et hypertensifs, positivants et toniques voire excitants à forte dose. Les phénols ont également la capacité de stimuler le système nerveux central.

Les phénols sont hépatotoxiques à haute dose ou lors de traitements prolongés par voie orale. Il convient donc d'accompagner leur prise de celle d'une huile essentielle hépatoprotectrice, particulièrement pour les traitements de plus de quelques jours.

La dermocausticité des dérivés phénoliques impose de diluer dans une huile végétale les huiles essentielles qui en sont riches. La réaction inflammatoire cutanée est plus importante et plus rapide avec les phénols qu'avec les terpènes. Leur capacité à irriter les muqueuses rend impossible leur diffusion atmosphérique.

Le carvacrol (de nature monoterpénique) est le plus toxique des phénols. On le retrouve en grande quantité dans certaines huiles exploitées pour leur puissante activité antibactérienne : Origan (*Origanum vulgare* L.) et sarriette (*Satureja montana* L.) par

exemple. Il est également présent en quantité variable dans l'huile essentielle de thym (*Thymus sp.*), où l'on retrouve un autre phénol dérivé du p-cymène : le thymol.

L'eugénol, phénol phénylpropanique, se retrouve en grande quantité dans le clou de girofle (*Syzygium aromaticum* L.) ou encore les feuilles du cannelier de Ceylan (*Cinnamomum verum* J.Presl). Puissant anti-infectieux, il se rapproche également des méthyl-éthers, antispasmodiques. C'est également un antiagrégant plaquettaire.

- **Monoterpénols**

Les alcools monoterpéniques sont également de très bons agents anti-infectieux, bien que moins puissants que les phénols. Leur mécanisme d'action est le même.

Ils sont par ailleurs immunomodulants (diminution des immunoglobulines hautes et augmentation des immunoglobulines basses). Ce sont de bons neurotoniques et stimulants généraux. Les monoterpénols sont hyperthermisants et hypertensifs, dans une moindre mesure que les phénols.

Globalement moins puissants que les phénols, ils sont également moins toxiques pour la peau, les muqueuses et le foie. Cela permet de les adresser à un public plus large (enfants) et de les utiliser sur des périodes plus longues.

- **Sesquiterpénols**

Les sesquiterpénols n'ont pour la grande majorité pas les propriétés anti-infectieuses des groupes précédents. Ils peuvent être toniques à différents niveaux (phlébotoniques, veinotoniques, cardiotoniques), certains ont une activité « hormone-like ». Ils sont décongestionnants veineux et lymphatiques. D'autres ont une action protectrice pour les cellules.

Les alcools sesquiterpéniques présentent une faible toxicité, particulièrement parce qu'ils ne sont présents qu'en faible quantité dans les huiles essentielles. Il faudra cependant être attentif à l'activité « hormone-like » de certains d'entre eux pour les patients présentant des pathologies hormono-dépendantes.

- **Diterpénols**

L'activité est principalement de type « hormone-like ».

Le sclaréol (Sauge sclarée, *Salvia sclarea* L.) a une structure proche de celle des hormones stéroïdes sexuelles humaines et donne à l'huile essentielle des propriétés « œstrogène-like »

IV.2.2.4. Aldéhydes

Les molécules à fonction aldéhyde ont des effets très différents selon leur nature : terpénique ou aromatique.

- **Aldéhydes terpéniques**

Les aldéhydes terpéniques sont des composés qui possèdent des propriétés intermédiaires entre les alcools et les cétones. Leur utilisation dans les huiles essentielles est associée à plusieurs effets bénéfiques pour la santé. Ils ont des propriétés anti-inflammatoires puissantes, agissant localement ou de manière plus générale en régulant le système neuroendocrinien. De plus, ils ont des effets sédatifs et apaisants sur le système nerveux central en influençant les neuromédiateurs.

Ces aldéhydes, souvent caractérisés par des notes citronnées, ont une tendance naturelle à réduire les tensions et à induire une sensation apaisante. Leur action relaxante au niveau central se manifeste également à d'autres niveaux de l'organisme, y compris en produisant un effet antihypertenseur.

Les aldéhydes terpéniques ont la capacité de stimuler l'activité des glandes exocrines et des hépatocytes en activant divers processus enzymatiques.

Bien que leur activité anti-infectieuse soit moins prononcée que celle des phénols et des alcools, ces aldéhydes possèdent néanmoins une capacité intéressante à lutter contre les bactéries lorsqu'ils sont diffusés dans l'air ou utilisés en contact direct sous forme liquide, y compris contre les formes sporulées. Leur activité antivirale est également considérable.

Grâce à leurs propriétés anti-inflammatoires, anti-stress et antivirales, les huiles essentielles contenant des aldéhydes terpéniques sont souvent privilégiées dans le traitement des infections herpétiques.

- **Aldéhydes aromatiques**

Les aldéhydes aromatiques présentent des propriétés similaires à celles des phénols, agissant comme de puissants agents anti-infectieux et toniques pour le système nerveux sympathique.

La toxicité interne des aldéhydes aromatiques est faible aux doses thérapeutiques, mais ils ont tendance à provoquer une irritation cutanée significative. Afin de minimiser les risques, il est recommandé de diluer les huiles essentielles contenant ces aldéhydes dans une huile végétale, en respectant une concentration maximale de 10%. De plus, ils ne doivent pas être utilisés en diffusion atmosphérique.

IV.2.2.5. Acides

Les acides sont des composés que l'on rencontre rarement dans les huiles essentielles. L'acide gérannique, présent dans le géranium, est l'un des plus couramment observés. Ces acides ont une faible volatilité. Ils sont souvent associés à des alcools pour former des esters, qui sont des composés aromatiques majeurs.

Parmi les molécules à fonction acide, on trouve certains des anti-inflammatoires les plus puissants présents dans les huiles essentielles. Les acides regroupent différentes structures moléculaires, telles que des acides gras insaturés ou mono-insaturés, des acides terpéniques insaturés et des acides aromatiques. Bien que présentes dans les huiles essentielles, ces molécules sont souvent présentes en faibles quantités, voire à l'état de traces. Cependant, certaines d'entre elles contribuent de manière significative à l'activité des huiles essentielles. De nombreux acides sont très solubles dans l'eau, ce qui explique leur faible présence dans les huiles essentielles, mais ils se retrouvent davantage dans les hydrolats aromatiques.

L'acide salicylique est l'un des acides aromatiques les plus connus. Il est notamment présent dans l'huile essentielle de gaulthérie, où il peut représenter jusqu'à 99% de la composition sous forme de salicylate de méthyle. Cette forme méthylée agit comme une forme "retard", libérant de l'acide salicylique par voie métabolique. Il possède des propriétés anti-inflammatoires, analgésiques et anti-agrégantes plaquettaires. Son action repose sur l'inhibition de la synthèse de certaines prostaglandines.

IV.2.2.6. Esters

Les esters sont formés par la combinaison d'un acide et d'un alcool. Ils sont généralement désignés par des noms se terminant par "-yle" pour l'alcool et "-ate" pour l'acide. Par exemple, l'acétate de linalyle est obtenu à partir de l'acide acétique et du linalol. Les esters ont souvent des arômes fruités, parfumés et sont hautement volatils. Ils s'évaporent rapidement lorsqu'ils sont exposés à l'air.

Les esters ont principalement des propriétés spasmolytiques musculotropes et neurotropes. Ils peuvent agir à différents niveaux, y compris au niveau central, sur les médiateurs et les récepteurs musculaires. Ils présentent également une activité anti-inflammatoire.

L'activité antispasmodique d'un ester est influencée par la nature de l'acide et de l'alcool qui le composent. Le nombre d'atomes de carbone dans l'acide d'origine détermine l'intensité de cette activité, qui augmente de l'acide formique (un atome de carbone) à l'acide benzylique (sept atomes de carbone) et diminue au-delà de sept atomes de carbone. Le tropisme de l'ester dépend de la nature de l'alcool. Les alcools sesquiterpéniques orientent l'activité de l'ester vers la sphère génitale et la région métabolique inférieure, tandis que les alcools monoterpéniques sont liés à la sphère...

Leurs vertus thérapeutiques :

- Effet sédatif : Ils ont un effet apaisant sur le système nerveux central.
- Propriétés antispasmodiques : Certains esters, tels que ceux présents dans la camomille romaine, sont reconnus pour leur capacité à soulager les spasmes

musculaires.

- Activité antimycosique : Les esters dérivés du géranium, par exemple, ont des propriétés antifongiques.

Exemples d'esters et les plantes qui les contiennent :

- Acétate de linalyle : On le trouve en quantité significative dans la lavande fine et le lavandin super.
- Acétate de géranyle : Présent dans des plantes comme le palmarosa, l'ylang-ylang et la lavande fine.
- Acétate de bornyle : On le retrouve notamment dans le ciste ladanifère.
- Acétate de benzyle : Présent dans l'ylang-ylang.
- Acétate de menthyle : Présent dans la menthe poivrée.
- Angelate d'isobutyle : Principalement présent dans la camomille romaine.
- Benzoate de benzyle : On le trouve notamment dans l'ylang-ylang.

IV.2.2.7. Ethers

Les éthers sont formés par la combinaison d'un acide et d'un phénol.

Leurs vertus thérapeutiques :

- Effet anti-inflammatoire : Ils ont la capacité de réduire les inflammations.
- Propriétés antispasmodiques : Les éthers peuvent soulager les spasmes musculaires.
- Effet calmant et décontractant : Ils ont des propriétés apaisantes et relaxantes.
- Propriétés analgésiques : Certains éthers ont des propriétés antalgiques, permettant de soulager la douleur.
- Rééquilibrage du système nerveux : Les éthers peuvent contribuer à rétablir l'équilibre du système nerveux.
- Action anti-allergique : Certains éthers ont des propriétés anti-allergiques.
- Effet hormone-like : Certains éthers peuvent agir de manière similaire aux hormones.
- Propriétés digestives : Certains éthers peuvent favoriser la digestion.

Toxicité : il est important de noter que les éthers peuvent être toxiques à fortes doses. Par exemple, le méthylchavicol (estragol) peut présenter des risques hépatiques et être cancérigène à fortes doses, et son utilisation est strictement réservée à l'adulte. Le

méthyleugénol, quant à lui, est contre-indiqué par voie orale et son utilisation doit être de courte durée.

Exemples d'éthers et les plantes qui les contiennent :

- Méthylchavicol (également appelé estragol) : On le trouve en grande quantité dans le basilic tropical, l'estragon et le laurier noble.
- Méthyleugénol : Présent dans le laurier noble et l'estragon.

IV.2.2.8. Phénols

Il convient de noter que les éthers, contrairement aux alcools, se terminent par le suffixe « ol », ce qui peut parfois prêter à confusion.

Les éthers font partie des molécules les plus efficaces pour lutter contre les infections. À faible dose, ils peuvent avoir un effet tonique, tandis qu'à forte dose, ils peuvent avoir un effet stimulant.

Leurs vertus thérapeutiques :

- Bactéricides : Les éthers ont la capacité de détruire les bactéries.
- Puissants agents anti-infectieux : Ils sont très efficaces pour lutter contre les infections.
- Fongicides : Les éthers peuvent également avoir une action antifongique, c'est-à-dire qu'ils peuvent combattre les champignons.
- Antiviraux : Certains éthers sont capables de lutter contre les virus.
- Parasitocides : Ils peuvent également agir contre les parasites.
- Antispasmodiques : Les éthers ont des propriétés relaxantes et peuvent soulager les spasmes musculaires.
- Immunostimulants : Ils peuvent stimuler le système immunitaire.

Toxicité : Il est important de noter que les éthers peuvent présenter une certaine toxicité à dose élevée, pouvant affecter légèrement le foie (hépatotoxicité). De plus, les phénols peuvent provoquer une réaction fébrile (hyperthermie) et être irritants pour la peau (dermocaustiques).

Exemples de phénols et les plantes dans lesquelles on les trouve :

- Thymol : Présent en grande quantité dans le thym vulgaire à thymol et en plus faible quantité dans le thym vulgaire à linalol.
- Eugénol : On le trouve notamment dans le laurier noble et le clou de girofle.
- Carvacrol : Présent dans l'origan vulgaire, l'origan d'Espagne et la sarriette des montagnes.

IV.2.2.9. Oxydes

Il est important de noter que les éthers sont généralement dérivés des alcools. Ils conservent le nom de l'alcool auquel on ajoute le terme « oxyde ».

Leurs vertus thérapeutiques :

- Puissant expectorant : Ils facilitent l'expulsion des sécrétions bronchiques.
- Antiviraux : Certains éthers ont la capacité de lutter contre les virus.
- Antiparasitaires : Ils peuvent agir contre les parasites.
- Antibactériens : Les éthers ont des propriétés antibactériennes.
- Antifongiques : Ils peuvent également combattre les champignons.
- Mucolytiques : Ils ont la capacité de fluidifier les sécrétions bronchiques.
- Stimulants gastro-entérite : Certains éthers peuvent stimuler l'activité gastro-intestinale.

Toxicité des éthers. Par exemple, le cinéol est strictement interdit chez les bébés. L'utilisation excessive des éthers peut également devenir toxique. Certains éthers peuvent entraîner des troubles temporaires, tels que des effets stupéfiants (anéthol), neurotoxiques et hépatotoxiques (ascaridol), ainsi que des convulsions (myristicine et apiol, présents dans le persil). Il est déconseillé aux personnes asthmatiques d'utiliser des éthers.

Exemple d'oxyde :

Oxyde de linalol

De plus, le cinéol, connu sous le nom de 1,8-cinéol, est présent dans différentes huiles essentielles, notamment l'eucalyptus radié, le naouli, le laurier noble, le ravintsara, le tea tree et la lavande aspic.

IV.2.2.10. Lactones

Les lactones sont identifiables par leur terminaison en « ine » ou « one ».

Leurs vertus thérapeutiques:

- Mucolytiques très puissants : Elles ont la capacité de fluidifier les sécrétions bronchiques de manière efficace.
- Elles stimulent le foie : Les lactones peuvent stimuler l'activité du foie.

Toxicité : Elles peuvent provoquer des réactions allergiques. Lorsqu'elles sont utilisées à des doses élevées et répétées, elles peuvent avoir des effets neurotoxiques, abortifs, stupéfiants et épileptogènes.

Exemples de lactones :

- Artémorine : Présente dans le laurier noble à hauteur de 0,5%.
- Myrtucommulone : Présente dans le myrte commun à hauteur de 45%.

IV.2.2.11. Couramines

Les couramines sont ainsi nommées en raison de leur relation avec les lactones, étant donné que leur nom se termine par « ine » ou « one ».

Les couramines ont une action spécifique sur le système nerveux central.

Leurs vertus thérapeutiques :

- Propriétés anticonvulsivantes : Elles ont la capacité de réduire les convulsions.
- Effet calmant : Elles ont des propriétés apaisantes.
- Effet sédatif : Elles favorisent la relaxation et le sommeil.
- Propriétés sudorifiques : Elles stimulent la transpiration.

Toxicité : Il est important de noter que les couramines ne doivent jamais être appliquées avant une exposition au soleil, car elles peuvent provoquer une photosensibilisation. Cela concerne notamment la bergamote et tous les agrumes.

Exemples de couramines :

- Herniarine : Présente dans la lavande fine à une concentration de 0,06%.
- Bergaptène : Présent dans la bergamote à une concentration de 0,2%.

IV.3. Variabilité de la composition

La composition chimique des huiles essentielles est influencée par de nombreux facteurs. Nous avons déjà mentionné les différents procédés d'extraction qui peuvent transformer l'essence.

La composition d'une huile essentielle dépend principalement de la plante elle-même et de son environnement de culture. Chaque étape du processus, de la récolte de la matière première à la conservation de l'huile essentielle, peut également entraîner des variations dans la concentration des composés ou même l'apparition de nouvelles molécules.

Il est important de prendre en compte la multitude de facteurs qui peuvent influencer la composition chimique d'une huile essentielle. Cela nous incite à les connaître en détail. Ainsi, il est possible de contrôler certains de ces facteurs, tels que l'irrigation, la période de récolte ou la méthode d'extraction. De plus, il est possible d'anticiper la composition de l'extrait obtenu. Cette connaissance est précieuse pour les consommateurs d'huiles essentielles, l'industrie qui recherche des rendements élevés dans l'extraction de molécules spécifiques ou une composition chimique stable, ainsi que pour les aromathérapeutes qui souhaitent tirer le meilleur parti de l'efficacité des huiles essentielles.

IV.3.1. Espèce et variété

Il est important de souligner l'importance de l'identification précise de la plante utilisée dans les huiles essentielles, en utilisant une nomenclature scientifique correcte. Bien que l'espèce elle-même ne soit pas un facteur majeur de variation de la composition des huiles essentielles, il existe de nombreuses confusions liées à l'utilisation de noms vernaculaires. Par conséquent, il est essentiel d'utiliser le nom scientifique de la plante, car différentes espèces peuvent être accessibles au public sous des noms tels que « lavande » ou « eucalyptus » (par exemple, *Lavandula angustifolia* Mill. et *Lavandula latifolia* Medik., ou *Eucalyptus globulus* Labill. et *Eucalyptus radiata* Sieber), et elles présentent des compositions, des propriétés et des toxicités différentes.

La mention éventuelle d'une variété et du premier descripteur sont également des informations importantes pour éviter toute confusion. Il est regrettable de constater que trop souvent, les huiles essentielles ne précisent pas l'organe producteur ni l'origine géographique. Pourtant, il est très utile d'inclure ces informations dans la dénomination de l'huile essentielle, car nous verrons qu'elles sont les premiers facteurs de variation de sa composition.

IV.3.2. Chémotype

La composition chimique des huiles essentielles n'est pas constante. Même deux plantes identiques du point de vue morphologique et caryologique peuvent produire des essences différentes. Ces variations de composition peuvent être très importantes et entraîner des différences significatives dans les propriétés de l'huile essentielle. Par conséquent, il est essentiel pour les thérapeutes de prendre en compte cette notion.

Les termes "chimiotype" et "chémoype" sont utilisés pour distinguer ces différents types chimiques. La notion de chémotype a été officiellement introduite par l'Union européenne avec l'adoption de la réglementation REACH (Enregistrement, Évaluation, Autorisation et Restriction des produits chimiques) en 2006. Généralement, on utilise les composés chimiques majoritaires pour désigner le chémotype. Parfois, des composés

moins abondants mais ayant une importance particulière en termes de propriétés de l'huile essentielle sont également pris en compte.

Ces différences chimiques au sein d'une même espèce sont le résultat de l'expression de différentes voies métaboliques présentes chez les individus, qui sont elles-mêmes influencées par de nombreux facteurs externes. Les facteurs qui influencent la composition chimique ne sont pas toujours facilement compréhensibles. Par exemple, des études sur le *Thymus vulgaris* L. ont montré que des plantes chimiquement distinctes peuvent pousser côte à côte [16].

Le cas du romarin (*Rosmarinus officinalis* L.) illustre bien l'importance de cette notion de chémotype. Trois chémotypes ont été définis pour le romarin, chacun ayant des propriétés spécifiques. Par exemple, le chémotype *Rosmarinus officinalis* L. ct 1,8-cinéole récolté en Tunisie et au Maroc possède des propriétés expectorantes et est utilisé dans les affections broncho-pulmonaires. Le chémotype *Rosmarinus officinalis* L. ct acétate de bornyle et verbénone, que l'on trouve en Corse, est utilisé dans les affections hépatiques. Enfin, le chémotype *Rosmarinus officinalis* L. ct camphre, présent en Provence et en Espagne, est utilisé pour faciliter l'effort musculaire et l'activité cardiaque, mais il présente également une certaine toxicité hépatique [17].

IV.3.3. Partie de la plante utilisée

Il est important de spécifier la partie de la plante à partir de laquelle une huile essentielle est extraite, ou si la plante entière a été utilisée. En effet, l'organe producteur a un impact sur le rendement d'extraction. Par exemple, on sait que la fleur de lavande contient beaucoup plus d'essence que sa tige. Des études ont montré que chez certaines sous-espèces d'origan, les petites bractées renferment plus d'huile essentielle que les grandes.

Ces mêmes études ont également révélé que la composition chimique de l'huile essentielle est fortement dépendante de l'organe producteur, ce qui constitue une autre raison pour laquelle il est essentiel de connaître la partie de la plante utilisée. Par exemple,

il a été observé que lorsque la taille des bractées utilisées pour l'extraction augmente, la concentration de certains monoterpènes (comme le p-cymène et le γ -terpinène) diminue, tandis que celle d'autres monoterpènes oxygénés (comme le linalol, l' α -terpinol et le thymol) augmente.

Le cas du cannelier de Ceylan illustre également la différence de composition chimique de l'huile essentielle en fonction de la partie de la plante utilisée. L'eugénol prédomine dans l'huile essentielle extraite des feuilles, l'aldéhyde cinnamique est majoritaire dans l'écorce, tandis que la racine est plus riche en camphre [18,19].

Parfois, différentes huiles essentielles issues de la même espèce peuvent porter des désignations différentes. C'est le cas de l'oranger amer (*Citrus aurantium* L. ssp *aurantium*). L'essence d'orange amère est obtenue à partir du péricarpe du fruit par expression à froid, l'huile essentielle de Néroli est obtenue par distillation des fleurs, tandis que l'huile essentielle de petit grain bigaradier est extraite des feuilles, des ramilles et des jeunes fruits.

IV.3.4. Période de récolte et cycle végétatif

La composition chimique des huiles essentielles peut varier en fonction du moment de la récolte de la plante. Des études ont montré que les huiles essentielles extraites à des moments différents ne sont pas identiques, et les rendements peuvent également différer.

Il est donc crucial de comprendre les variations tout au long du cycle végétatif de la plante afin de choisir le moment le plus opportun pour la récolte. Par exemple, dans le cas de la menthe poivrée, le pourcentage de cétones toxiques telles que la menthone et l'isomenthone augmente au moment de la floraison [17].

Pour la coriandre, extraire l'huile essentielle à partir de fruits mûrs donnera une teneur en linalol 50% plus élevée que si elle est extraite à partir de fruits verts.

La verveine du Maroc produit du 1,8-cinéole pendant la période de floraison, qui se situe entre avril et mai [20].

Pour la lavande, la valeur marchande de son huile essentielle dépend largement de son indice d'ester, qui atteint son maximum lorsque les deux tiers des fleurs sont ouverts. Il est donc important de surveiller attentivement la floraison de la lavande pour la récolter au moment le plus approprié. [21].

Dans le cas de la sauge, de nombreuses études ont été menées dans différents pays pour suivre l'évolution de l'huile essentielle tout au long de son cycle de vie. On a observé que le rendement maximal est obtenu en novembre et que la teneur en thuyone et en camphre (cétones) est à son maximum en hiver, mais chute rapidement pendant les mois d'avril et de mai, atteignant son minimum au moment de la floraison. Le β -pinène et le 1,8-cinéole (monoterpènes) présentent des variations inverses tout au long de l'année. Les variations de composition peuvent également être observées en fonction de l'âge des feuilles. [22,23].

Ces variations saisonnières dans la composition chimique des huiles essentielles sont bien connues et permettent d'adapter la période de récolte en fonction de l'intérêt spécifique et de l'utilisation finale de l'huile essentielle.

Dans le cas du thym à thymol, des variations importantes ont été observées dans la composition chimique et le rendement en huile essentielle. Par exemple, le thymol et le p-cymène varient de manière inverse, avec un ratio de 4:1 pendant la période de floraison et des variations entre 3:1 et 1:1 pendant le reste du cycle. Le γ -terpinène suit généralement les variations du thymol, sauf en période post-floraison où il diminue. Ces observations indiquent qu'il est possible d'étudier et de comprendre les variations saisonnières dans la composition chimique des huiles essentielles, ce qui permet de déterminer le meilleur moment pour la récolte en tenant compte du compromis entre rendement et composition chimique.

Certaines études ont examiné les variations de la composition chimique et du rendement des huiles essentielles au cours d'une seule journée. Par exemple, pour les

fleurs de roses, il est généralement préférable de les récolter entre 6h et 9h du matin pour obtenir un meilleur rendement.

La multiplicité des variations possibles en fonction du moment de la récolte rend l'étude et la comparaison des résultats entre les études plus complexes. Chez *Ocimum gratissimum*, le rendement en huile essentielle augmente considérablement jusqu'à la maturité moyenne des graines, puis à nouveau en fin de cycle végétatif. Cependant, ce rendement varie également selon le moment de la journée, avec une faible quantité le matin (0,3% à 7h), un maximum à midi (1,8%), et une diminution progressive dans l'après-midi (1,6% à 19h).

La période du cycle végétatif influe également sur la proportion de chaque composé chimique dans l'huile essentielle. Par exemple, le trio thymol/ γ -terpinène/p-cymène représente environ 75% de l'huile essentielle tout au long de l'année, mais la proportion de chaque molécule varie. Le γ -terpinène reste cependant le composant prédominant. Des échantillons prélevés à différents moments de la journée montrent également que les conversions entre ces composés se produisent rapidement [24].

La grande instabilité de la composition chimique de l'huile essentielle observée chez *Ocimum gratissimum* souligne la nécessité de faire preuve de prudence lors de la définition du profil chromatographique d'une huile essentielle ou lors de sa comparaison avec un autre échantillon, car les variations au sein d'un même individu peuvent être rapides. Cette étude souligne également l'importance de l'influence de l'heure et de la période de récolte sur la composition d'une huile essentielle.

IV.3.5. Facteurs environnementaux

De nombreux facteurs extérieurs à la plante sont susceptibles d'influencer son développement : température, humidité, durée, ensoleillement, vents, nature du sol... Ces facteurs peuvent ainsi faire grandement varier la quantité et la qualité de l'huile essentielle produite, ce qui peut avoir des répercussions importantes sur le marché mondial.

Les conditions environnementales auxquelles la plante est exposée jouent sur l'expression des gènes de la plante et vont ainsi modifier le développement de la biomasse et sur l'aiguillage de chaque voie métabolique, tant pour le métabolisme primaire que secondaire et sur les transformations secondaires. Cet impact sur la production de l'huile essentielle est plus ou moins important selon les espèces.

L'influence **des facteurs climatiques** semble plus grande chez les espèces dont les structures de stockage se trouvent à la surface du végétal, comme par exemple les poils sécréteurs des Lamiaceae. La qualité de l'essence sera plus constante si elle se trouve dans des tissus plus profonds. L'origine géographique de l'espèce joue aussi sur sa sensibilité aux facteurs climatiques. Les plantes tropicales sont surtout soumises à l'alternance des saisons sèches et humides, les plantes de régions tempérées seront plus sensibles à la longueur des jours.

Ainsi, il existe de nombreux exemples de plantes dont la sensibilité à **la lumière du jour** a été étudiée. Chez la menthe poivrée (*Mentha x piperita* L.), une longueur de jour minimum est requise pour que la plante quitte la phase végétative. Ce changement s'accompagne d'une modification de la composition de l'huile essentielle. De manière générale, des jours longs et des nuits tempérées augmentent le rendement en huile essentielle, celle-ci étant alors plus riche en menthofurane. Dans des conditions inverses, l'huile essentielle s'enrichit en menthol [61]. Des observations similaires ont également été faites pour l'origan (*Origanum vulgare* L.) et la marjolaine (*Origanum majorana* L.) [21].

Il a été montré que chez le laurier noble (*Laurus nobilis* L.), les feuilles exposées au sud avaient une teneur en huile essentielle plus importante que celles exposées au nord.

Les pratiques agricoles peuvent également avoir un impact sur les huiles essentielles. Par exemple, le régime hydrique et l'apport d'engrais peuvent modifier les caractéristiques de l'huile essentielle produite. Prenons l'exemple de la menthe poivrée, qui synthétise normalement du (-)-menthol, responsable de son arôme mentholé distinctif. Cependant,

lorsqu'elle est cultivée avec certains engrais, le (+)-menthol remplace le (-)-menthol dans l'huile essentielle, ce qui lui donne une odeur considérée comme inexistante, voire désagréable. De plus, la supplémentation en azote favorise la croissance de la plante et retarde sa floraison, ce qui entraîne une augmentation de la production d'huile essentielle contenant moins de menthol et davantage de menthone. En revanche, l'apport de potassium favorise la maturation de la plante, mais réduit son rendement en huile essentielle, qui contient alors plus de menthol et d'acétate de méthyle.

De manière générale, **la fertilisation du sol** influence le rendement en favorisant le développement de la plante et en augmentant la quantité de biomasse disponible.

Elle joue également un rôle dans la composition chimique de l'huile essentielle, bien que cela varie selon les espèces. Par exemple, l'ajout d'azote au substrat a un impact sur de nombreuses espèces végétales, comme mentionné précédemment pour la menthe poivrée. L'ajout de fer est souvent utilisé pour lutter contre la chlorose, une maladie qui provoque le jaunissement et le dépérissement des feuilles, mais il peut également affecter la quantité d'huile essentielle produite. Le zinc peut augmenter le rendement en huile essentielle chez le palmarosa, tandis que le manganèse est considéré comme l'oligo-élément le plus efficace pour augmenter la productivité, bien que son dosage doive être précis. L'urée a un impact sur la production d'huile essentielle chez la citronnelle de Java, mais son effet dépend de la forme sous laquelle elle est apportée. En revanche, le potassium semble avoir peu d'influence, voire peut réduire le rendement lorsqu'il est utilisé en excès. Il est également important de prendre en compte les métaux lourds tels que le plomb, le cadmium, le mercure, le zinc, le nickel et le cuivre, car ils peuvent affecter le développement de la plante et la qualité finale de l'huile essentielle extraite.

Le sol influence également la composition de l'huile essentielle. Par exemple, dans le cas du thym, la transformation du p-cymène en thymol augmente lorsque la plante pousse dans du sable et lorsque les intervalles d'arrosage sont prolongés (10 jours), ce qui correspond à des conditions moins favorables. En général, les plantes subissant des stress

hydriques produisent davantage de métabolites secondaires, bien que certaines espèces puissent voir leur capacité à produire ces métabolites diminuer.

L'influence de **la température** sur la production d'huile essentielle est plus complexe et spécifique à chaque espèce, ce qui rend difficile son évaluation générale.

On sait que la plupart des espèces végétales ne se trouvent que dans une plage d'altitude spécifique. Des études ont été menées pour déterminer l'impact **de l'altitude** sur le profil biochimique des plantes. Par exemple, il a été constaté que la lavande cultivée à haute altitude produisait jusqu'à 10% de plus d'esters (acétate de linalyle) que celle cultivée à une altitude moyenne.

Cette différence est également observée lorsque la plante est soumise à **la sécheresse**. Des études sur l'armoise de l'Himalaya (*Artemisia roxburghiana* Besser var. *purpurascens*) ont également révélé d'importants changements dans l'huile essentielle en fonction de l'altitude de récolte. Le rendement et le profil chromatographique de l'huile essentielle diffèrent considérablement selon l'altitude, avec des constituants majeurs variant significativement [21].

L'impact des **agressions extérieures** sur le développement des plantes et la production d'huile essentielle est connu depuis longtemps. Par exemple, Eugène Charabat a décrit en 1908 les conséquences du parasitisme par un acarien dans les champs de menthe poivrée près de Grasse, en France. Il a observé des transformations morphologiques des plants touchés, ainsi qu'une augmentation de la quantité d'huile essentielle, bien que sa qualité soit jugée inférieure. Dans les plantes touchées, l'huile essentielle était enrichie en éther, tandis que les cétones (menthone) étaient présentes en quantité négligeable [21].

Zabaras et al. ont étudié les changements de production d'huile essentielle dans les 48 heures suivant une blessure des feuilles chez l'arbre à thé (*Melaleuca alternifolia*). Après l'agression, la concentration d'huile essentielle diminue dans toutes les feuilles, mais les feuilles les plus matures retrouvent leur rendement initial après seulement 24 heures. La composition chimique de l'huile essentielle est également affectée dans toutes les

feuilles, indépendamment de la composition initiale de l'huile. Certaines concentrations de terpènes augmentent en effet. Le rôle écologique de ces variations est probable, mais il reste à déterminer. Du point de vue commercial, la principale préoccupation réside principalement dans la diminution du rendement, tandis que les changements dans la composition restent peu importants [25].

IV.3.6. Traitements post-récolte et conservation

Différents traitements peuvent être appliqués à la matière végétale entre le moment de la récolte et celui de l'extraction, et ces opérations peuvent avoir une incidence sur le résultat de l'extraction.

- **Séchage:**

La première différence notable dépend de la matière végétale utilisée fraîche ou séchée lors de l'extraction. Le séchage peut être effectué pour des raisons pratiques telles que la proximité des installations ou la nécessité de répartir la production dans le temps afin de faciliter la conservation de la plante. Chez les plantes de la famille des Lamiacées, même un stockage de seulement 24 heures peut entraîner des changements significatifs dans la composition de l'huile essentielle, certains étant souhaitables.

Des études sur des espèces du genre *Ocimum* ont montré que le rendement en huile essentielle augmente jusqu'à trois jours de séchage, puis se stabilise. La composition chimique de l'huile est également affectée, avec une diminution du γ -terpinène et du thymol, et une augmentation du p-cymène lors du séchage. La composition chimique dans la feuille continue d'évoluer jusqu'à 15 jours après le début du séchage [26].

Ces modifications lors du séchage ou d'autres traitements post-récolte dépendent largement des structures de production et de stockage de l'huile essentielle dans la plante. Les structures profondes offrent une meilleure protection de l'intégrité de l'huile. Par exemple, chez l'armoise annuelle (*Artemisia annua*), le rendement en huile essentielle est réduit de moitié si le séchage est effectué à 65 °C au lieu de la température ambiante, et le ratio monoterpènes/sesquiterpènes est également affecté. Une tendance similaire est

observée chez les Lamiacées. Pour le thym (*Thymus vulgaris*) et la sauge (*Salvia officinalis*), le séchage à 60 °C affecte considérablement le rendement, contrairement à la lyophilisation ou au séchage à 30 °C. Des températures élevées affectent davantage le thym, dont les structures de stockage sont très endommagées à ces niveaux. Dans tous les cas, la composition chimique de l'huile essentielle est affectée, quelle que soit la méthode de séchage utilisée. Le choix du procédé et de la température doit donc être adapté à l'espèce concernée, en tenant compte notamment de son histologie.

Par exemple, pour le thym, un séchage naturel à température ambiante, bien que plus long, entraîne une perte de thymol dans l'huile essentielle. En revanche, la lyophilisation, qui est très rapide, permet de préserver une teneur élevée, voire augmentée, en thymol. Un séchage à 40 °C semble être le meilleur compromis, car c'est dans ces conditions que la composition de la plante fraîche est le mieux préservée. Cette tendance est générale pour les monoterpènes chez d'autres Lamiaceae, comme le carvacrol du thym et de la sarriette (*Satureja montana* L.) [27].

- **L'extraction**

L'extraction est une étape essentielle du traitement de la matière végétale qui peut entraîner des modifications significatives de l'huile essentielle. Les constituants des essences sont sensibles à la chaleur, ce qui explique que la composition du produit obtenu par différents processus d'extraction diffère souvent de celle du mélange initial présent dans la plante. L'hydrodistillation, par exemple, expose ce mélange à des conditions relativement agressives en termes de température, d'acidité et de chaleur, ce qui peut provoquer des réactions d'isomérisation, de racémisation, d'oxydation, de réarrangement, d'hydrolyse (notamment des esters), etc. En plus des problèmes de modification des composés chimiques présents dans l'huile essentielle, l'utilisation de l'eau comme solvant présente des limites. Certains composés ont une solubilité non négligeable dans l'eau et y resteront, ce qui réduit leur proportion dans le produit final. En revanche, d'autres composés, particulièrement lourds, sont difficiles à entraîner par la vapeur d'eau. On observe également des variations de la composition chimique dans le produit final de

certaines huiles essentielles, comme celle de l'arbre à thé (*Melaleuca alternifolia* Cheel), à mesure que l'extraction se prolonge. Par exemple, une étude menée par Bophy et al. a montré qu'après 30 minutes de distillation, l'huile essentielle obtenue contenait 55,9% de terpinèn-4-ol, contre 25,1% après une heure. Une distillation relativement courte favorise le terpinèn-4-ol au détriment des autres terpènes, ce qui peut potentiellement augmenter l'activité de l'huile essentielle tout en réduisant la présence d'éventuels allergènes. Ainsi, le choix de la cinétique de distillation dépend des composés présents dans l'essence et de ceux que l'on souhaite obtenir. Les composés les plus légers seront extraits en premier, tandis que les plus lourds apparaîtront en dernier.

Pour comparer ces méthodes d'extraction, plusieurs critères sont pris en compte, tels que le rendement, le temps (et donc l'énergie) nécessaire à l'extraction, la composition de l'huile essentielle et l'analyse sensorielle de l'huile. Les chercheurs ont conclu que les extraits obtenus par les méthodes de distillation innovantes étaient généralement équivalents à ceux obtenus par les méthodes traditionnelles. Cependant, la méthode la plus satisfaisante a été l'hydrodiffusion micro-ondes et gravité, car elle nécessite seulement 30 minutes d'extraction sans perte de rendement ni de qualité sensorielle. L'hydrodistillation et la distillation à la vapeur d'eau ont donné des produits de composition similaire, mais une partie de l'acétate de linalyle semblait se dégrader en linalol lors de l'hydrodistillation, probablement en raison du contact plus important entre la plante et l'eau.

Cette tendance était encore plus prononcée avec la turbohydrodistillation, ce qui en fait une mauvaise méthode pour le lavandin. La distillation assistée par les ultrasons a donné un résultat similaire à celui de l'hydrodistillation. Dans l'ensemble, l'association avec les micro-ondes, quelle que soit la méthode utilisée, semblait limiter les dégradations. En ce qui concerne la qualité sensorielle des extraits, peu de différences ont été observées entre les huit méthodes en ce qui concerne les notes florales, herbacées et camphrées. La seule différence notable concerne la turbohydrodistillation, pour laquelle les notes musquées semblent plus marquées que pour les autres méthodes. Cette étude montre que

les méthodes développées ces dernières années n'apportent pas d'amélioration en termes de qualité ou de quantité, mais plutôt en termes d'économie d'énergie.

Tous les paramètres liés à l'extraction peuvent influencer le résultat final de l'huile essentielle. Il est important de noter que la distillation de petites quantités en laboratoire ou dans une installation pilote peut donner une huile essentielle différente de celle obtenue à grande échelle dans le cadre d'une production industrielle. Par conséquent, il est nécessaire de faire preuve de prudence lors de l'extrapolation des données expérimentales pour la production industrielle ou lors de l'établissement d'une référence pour le profil chromatographique d'une huile essentielle. De plus, il est difficile d'exclure les différences entre les installations rudimentaires utilisées par de petits producteurs dans des régions éloignées et les installations ultramodernes utilisées pour les expérimentations. Cela peut poser un problème, compte tenu du fait que la plupart de la production mondiale d'huiles essentielles est effectuée à l'étranger par des producteurs qui n'ont pas accès à un équipement sophistiqué.

- **Stockage**

La stabilité d'une huile essentielle pendant le stockage est un facteur crucial pour assurer sa sécurité d'utilisation et sa valeur commerciale.

Il existe peu d'études sur la stabilité des huiles essentielles pendant la phase de stockage, et la plupart d'entre elles se concentrent sur l'oxydation, généralement provoquée, plutôt que sur les conditions de conservation « naturelles », qui demanderaient beaucoup de temps. Néanmoins, d'autres facteurs doivent être pris en compte, tels que l'exposition à la chaleur, à la lumière, à l'oxygène et à l'humidité, ainsi que les matériaux utilisés pour les contenants et la durée du stockage.

En général, la proportion de terpènes insaturés a tendance à diminuer avec le temps en raison de réarrangements chimiques. La proportion de composés oxydés augmente, mais cette augmentation varie considérablement en fonction de l'huile essentielle et de la sensibilité de ses composants. Il convient de noter que toutes les huiles essentielles ne se

conservent pas de la même manière. Par exemple, l'huile essentielle de fenouil (*Foeniculum vulgare* L.) est relativement instable, même lorsqu'elle est conservée à l'abri de la lumière, et subit d'importantes dégradations après seulement deux mois.

Il est donc difficile de déterminer une durée de conservation générale pour les huiles essentielles, d'autant plus que peu d'espèces différentes ont été étudiées à cet égard. Chaque huile essentielle peut vieillir à son propre rythme, et les résultats peuvent varier considérablement.

IV.3.7. Normalisation des Huiles essentielles

L'absence de standardisation constitue un obstacle majeur au développement de l'utilisation des huiles essentielles et à la garantie de résultats lors de leur utilisation. Ainsi, la normalisation de ces extraits est devenue rapidement nécessaire pour répondre à la demande croissante de reproductibilité de la part des clients. La première norme française a été établie en 1956. Son objectif initial était d'uniformiser le vocabulaire, la nomenclature, les méthodes analytiques et les spécificités des huiles essentielles afin d'évaluer leur qualité. Aujourd'hui, les normes sont de plus en plus précises et englobent de nouveaux critères, tels que les caractéristiques sensorielles (apparence, odeur, couleur) et physico-chimiques (densité, indice de réfraction, pouvoir rotatoire, miscibilité avec l'alcool, indice d'acidité, etc.), ainsi que la composition chimique des huiles essentielles. Ces normes exigent également une maîtrise des étapes de production, notamment la standardisation des équipements et des procédés utilisés.

Actuellement, il existe plus de 140 normes AFNOR (Association française de normalisation) relatives aux huiles essentielles, mais la tendance est à l'internationalisation des normes : plus de 90 normes ISO (Organisation internationale de normalisation) ont été publiées et une dizaine d'autres sont en cours d'élaboration. Ces textes normatifs sont réévalués tous les trois à cinq ans. Ces normes sont devenues des références et permettent, entre autres, de résoudre les problèmes techniques de communication entre les fournisseurs et les clients. Les normes AFNOR sont également reconnues par la Direction

Générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des Fraudes (DGCCRF) en France.

Étant donné que répondre à des normes constitue un gage de qualité pour les clients, certains laboratoires apposent des labels de qualité sur leurs huiles essentielles, même si ces labels sont parfois non officiels et auto-définis. Cependant, ils témoignent de la volonté des laboratoires d'adopter un niveau de qualité garanti pour les consommateurs. Ces labels ont également l'avantage d'être plus compréhensibles et parlants pour le consommateur moyen que la référence à une norme ISO, ce qui en fait un élément supplémentaire utilisé dans le marketing et la communication. Par exemple, on peut citer les labels HECT (Huile Essentielle Chémotypée) et HEBBD (Huile Essentielle Botaniquement et Biochimiquement Définie).

IV.4. Propriétés des différents composés

Chaque molécule possède des caractéristiques uniques et un profil d'activité spécifique. Cependant, au sein d'une même classe chimique, il existe des propriétés générales communes à toutes les molécules qui en font partie. Étant donné la grande diversité des composés chimiques mentionnés précédemment et de leurs propriétés variées, il est impossible de fournir une description détaillée pour chaque molécule pouvant contribuer à l'activité d'une huile essentielle.

Le spectre d'activité d'une molécule ne dépend pas uniquement de sa classe chimique, mais également des groupements fonctionnels qu'elle contient (relations structure-activité). Il est également important de rappeler que si la connaissance des principales molécules présentes dans une huile essentielle permet de prédire en partie son activité, cette activité ne peut être réduite à la simple superposition des propriétés individuelles de chaque composant. Tous les composés présents dans l'huile essentielle peuvent moduler l'activité des autres, y compris ceux présents en faibles quantités.

IV.4.1. Terpènes

Les huiles essentielles contiennent principalement des terpènes, qui sont les molécules les plus abondantes. En raison de leur propension à la polymérisation et aux changements de configuration spatiale, il est essentiel de prendre des précautions pour conserver les huiles essentielles et préserver leurs propriétés.

IV.4.1.1. Carbures monoterpéniques

Parmi les terpènes, les monoterpènes sont connus pour leurs effets toniques généraux. Ce sont d'excellents antiseptiques, notamment lorsqu'ils sont diffusés dans l'atmosphère. On observe naturellement cet effet dans les forêts de conifères, comme les pins et les sapins, qui produisent des résines riches en terpènes. Certains monoterpènes stimulent l'axe hypophyso-corticosurrénalien et ont un effet similaire à la cortisone, ce qui peut être bénéfique dans les états inflammatoires prolongés.

Par exemple, les huiles essentielles de pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) et d'épinette noire (*Picea mariana* Mill.), riches en monoterpènes tels que l' α -pinène, le β -pinène, le δ -3-carène et le myrcène, ont démontré cette action [28].

Ces composés sont également d'importants immunostimulants. Par exemple, l'huile essentielle d'épicéa (*Pinus abies* L.) a été étudiée pour sa capacité à stimuler la production de γ -globulines.

Les monoterpènes sont également efficaces en tant qu'expectorants et décongestionnants respiratoires. Certains d'entre eux stimulent les sécrétions digestives, tant gastriques qu'intestinales. Le limonène, présent dans de nombreuses huiles essentielles traditionnellement utilisées comme condiments, en est un exemple.

Certains monoterpènes sont présents dans de nombreuses huiles essentielles et leurs propriétés sont bien connues. Par exemple, l' α -pinène et le β -pinène ont des effets lymphotoniques et décongestionnants. Le p-cymène a également démontré un effet antalgique intéressant par voie cutanée, ce qui peut être bénéfique pour soulager les

douleurs localisées. Le limonène, le terpène le plus répandu, stimule la microcirculation digestive [28].

Il est important d'être prudent lors de l'utilisation des huiles essentielles contenant une quantité significative de carbures monoterpéniques en raison de leur dermocausticité relativement prononcée. L'application directe de ces huiles essentielles sur la peau, et surtout sur les muqueuses, peut entraîner des rougeurs, des sensations de brûlure et des démangeaisons. Par conséquent, il est recommandé de diluer ces huiles essentielles dans une huile végétale et de limiter leur utilisation dans la durée.

Il convient également de mentionner que l'huile essentielle de térébenthine (*Pinus pinaster* L.) et l'huile essentielle de rameaux de genévrier (*Juniperus communis* L.), qui sont riches en monoterpènes, sont néphrotoxiques.

De plus, ces composés présentent un risque certain d'allergie et de sensibilisation, en particulier chez les professionnels qui les manipulent fréquemment, et ces effets peuvent se manifester après plusieurs années [28].

IV.4.1.2. Carbures sesquiterpéniques

Certains carbures sesquiterpéniques polyinsaturés ont démontré une activité anti-inflammatoire, ce qui se traduit par un effet anti-hyper- α -2-globulinémie. Le β -caryophyllène est le sesquiterpène le plus fréquemment trouvé, notamment dans les plantes de la famille des Lamiaceae.

Le chamazulène est également un puissant antihistaminique utilisé pour traiter les allergies. Les huiles essentielles contenant du chamazulène sont utilisées pour des problèmes cutanés tels que l'acné rosacée, mais aussi comme antihistaminiques chez certains asthmatiques [3]. Cependant, ces composés peuvent conférer aux huiles essentielles qui les contiennent des propriétés irritantes, bien que moins prononcées que celles de leurs homologues monoterpéniques. Par conséquent, leur utilisation est généralement recommandée sous forme diluée.

IV.4.1.3. Carbures terpéniques lourds (C₂₀ à C₄₀)

Les carbures terpéniques lourds (C₂₀ à C₄₀) sont des molécules relativement rares dans les plantes et leur présence dans les huiles essentielles est souvent variable en raison de leur poids moléculaire élevé, ce qui complique leur extraction. Ces composés peuvent avoir des propriétés variées telles que des effets anti-inflammatoires, antioxydants ou expectorants.

IV.4.2. Alcools et phénols

En ce qui concerne les alcools et les phénols, ces molécules sont abondamment présentes dans les huiles essentielles, après les terpènes. Ils possèdent une puissante activité anti-infectieuse en neutralisant directement les agents pathogènes, tout en corrigeant les déséquilibres favorables à leur développement et en stimulant l'immunité [28].

IV.4.2.1. Phénols

Les phénols sont des agents anti-infectieux très puissants. Ils ont une action antibactérienne à large spectre, étant efficaces contre la plupart des bactéries pathogènes, et sont également virucides, fongicides et antiparasitaires. Leur mécanisme d'action consiste à perturber les lipides de la membrane des micro-organismes et à dénaturer les protéines. En plus de leur activité antibactérienne, ils ont la capacité de stimuler l'immunité. Les phénols ont également des effets hyperthermisants et hypertensifs, et à fortes doses, ils peuvent avoir des effets positifs, toniques voire excitants. De plus, les phénols ont la capacité de stimuler le système nerveux central [28].

Il convient de noter que les phénols peuvent être hépatotoxiques à des doses élevées ou lors d'une utilisation prolongée par voie orale. Il est donc recommandé de prendre des précautions en utilisant une huile essentielle hépatoprotectrice en même temps, en particulier pour les traitements de plus de quelques jours. En raison de leur potentiel dermocaustique, les huiles essentielles riches en dérivés phénoliques doivent être diluées dans une huile végétale. Les réactions inflammatoires cutanées sont plus prononcées et

plus rapides avec les phénols par rapport aux terpènes, et leur capacité à irriter les muqueuses rend impossible leur utilisation en diffusion atmosphérique.

Le carvacrol, qui est un phénol de nature monoterpénique, est le plus toxique parmi les phénols. Il est présent en grande quantité dans certaines huiles essentielles utilisées pour leur puissante activité antibactérienne, telles que l'origan (*Origanum vulgare* L.) et la sarriette (*Satureja montana* L.). On le trouve également en quantité variable dans l'huile essentielle de thym (*Thymus* sp.), où l'on trouve un autre phénol dérivé du p-cymène : le thymol. L'eugénol, un phénol phénylpropanique, est présent en grande quantité dans le clou de girofle (*Syzygium aromaticum* L.) et dans les feuilles du cannelier de Ceylan (*Cinnamomum verum* J.Presl). Il possède de puissantes propriétés anti-infectieuses et présente également des similitudes avec les méthyl-éthers, qui sont des antispasmodiques. De plus, l'eugénol a également des propriétés antiagrégantes plaquettaires [2].

IV.4.2.2. Monoterpénols

Les alcools monoterpéniques sont également des agents anti-infectieux efficaces, bien que moins puissants que les phénols. Leur mécanisme d'action est similaire. Ils ont également des propriétés immunomodulatrices, réduisant les immunoglobulines élevées et augmentant les immunoglobulines basses. Les monoterpénols agissent comme des neurotoniques et des stimulants généraux. Bien qu'ils aient des effets hyperthermisants et hypertensifs, ces effets sont moins prononcés que ceux des phénols [2].

Globalement, les alcools monoterpéniques sont moins puissants que les phénols, mais ils sont également moins toxiques pour la peau, les muqueuses et le foie. Cela les rend adaptés à un large public, y compris les enfants, et permet une utilisation sur des périodes plus longues.

Le géraniol est le monoterpénol le plus puissant en termes d'activité antimicrobienne. Il est abondant dans l'huile essentielle de palmarosa (*Cymbopogon martinii* Stapf. var. *motia*) et de citronnelle (*Cymbopogon winterianus* Jowitt). Le linalol, en plus d'être astringent et tonique cutané, a également des propriétés sédatives. Il est

largement répandu, notamment dans la lavande vraie (*Lavandula angustifolia* Mill.), le thym (*Thymus vulgaris* L. ct linalol) et représente parfois plus de 90% de l'huile essentielle de bois de rose (*Aniba rosaedora* Ducke). Le citronellol est connu pour ses propriétés insectifuges, notamment contre les moustiques. Le menthol est un stimulant hépatique et un vasoconstricteur [2].

IV.4.2.3. Sesquiterpénols

La plupart des sesquiterpénols n'ont pas les propriétés anti-infectieuses des groupes précédents. Ils peuvent agir comme des toniques à différents niveaux, tels que phlébotoniques, veinotoniques et cardiotoniques. Certains sesquiterpénols ont une activité similaire à celle des hormones. Ils ont des effets décongestionnants sur les veines et les vaisseaux lymphatiques, et certains ont une action protectrice sur les cellules.

Les alcools sesquiterpéniques présentent une faible toxicité, principalement parce qu'ils sont présents en faible quantité dans les huiles essentielles. Cependant, il convient d'être attentif à l'activité similaire à celle des hormones de certains d'entre eux chez les patients présentant des affections dépendantes des hormones.

L' α -bisabolol, que l'on trouve dans l'huile essentielle de camomille allemande (*Matricaria recutita* L.), est un actif apprécié dans l'industrie cosmétique pour ses propriétés anti-inflammatoires. Le cédrol est un bon tonique veineux, tout comme le viridiflorol, qui présente également une activité similaire à celle des œstrogènes [28].

IV.4.2.4. Diterpénols

En ce qui concerne les diterpénols, leur activité est principalement de type similaire à celle des hormones. Le sclaréol, extrait de la sauge sclarée (*Salvia sclarea* L.), présente une structure similaire à celle des hormones stéroïdes sexuelles humaines et confère à l'huile essentielle des propriétés similaires à celles des œstrogènes [2].

IV.4.3. Aldéhydes

Les aldéhydes terpéniques ont des propriétés qui se situent entre celles des alcools et des cétones. Ils sont considérés comme de puissants anti-inflammatoires, agissant localement directement ou de manière plus générale en régulant le système neuroendocrinien.

Ces molécules ont également des effets sédatifs et apaisants sur le système nerveux central, agissant sur les neuromédiateurs. Les odeurs citronnées (souvent associées aux aldéhydes) ont une tendance naturelle à réduire les tensions. Leur action apaisante sur le système nerveux central se traduit également par un effet antihypertenseur.

IV.4.3.1. Aldéhydes terpéniques

Les aldéhydes terpéniques ont la capacité de stimuler l'activité des glandes exocrines ainsi que celle des hépatocytes en activant divers processus enzymatiques.

Leur activité anti-infectieuse est réelle, bien qu'elle soit moins prononcée que celle des phénols et des alcools. Cependant, ils sont efficaces contre les bactéries lorsqu'ils sont diffusés dans l'air ou en contact liquide, agissant sur les bactéries courantes ainsi que sur les formes sporulées. Leur activité antivirale est également très bonne.

Grâce à leurs effets anti-inflammatoires, anti-stress et antiviraux, les huiles essentielles contenant des aldéhydes terpéniques sont un traitement de choix pour les infections herpétiques.

Les aldéhydes terpéniques ne sont que modérément toxiques. Ils peuvent parfois être irritants pour la peau et les muqueuses, provoquant un érythème localisé. Ils ont également des propriétés lacrymogènes et expectorantes. Par conséquent, les huiles essentielles contenant des aldéhydes terpéniques doivent être diluées dans une huile végétale (à 50%).

Par exemple, le gèranial et le néral, qui sont respectivement les isomères trans et cis du citral, se trouvent dans des plantes telles que la mélisse (*Melissa officinalis* L.), la

verveine citronnée (*Lippia citriodora* Kunth) et dans l'écorce de citron (*Citrus limon* L.) ainsi que dans d'autres espèces de Rutaceae. Ils possèdent des propriétés anti-inflammatoires puissantes, tout comme le citronellal contenu dans la citronnelle de Java (*Cymbopogon winterianus* Jowitt) et l'eucalyptus citronné (*Eucalyptus citriodora* Hook.).

IV.4.3.2. Aldéhydes aromatiques

Les aldéhydes aromatiques présentent des propriétés similaires à celles des phénols. Ce sont des agents anti-infectieux puissants et ils agissent comme toniques pour le système nerveux sympathique.

L'aldéhyde cinnamique, également connu sous le nom de cinnamaldéhyde, est le plus connu parmi les aldéhydes aromatiques. Il est présent dans la cannelle de Chine (*Cinnamomum aromaticum* Ness) et la cannelle de Ceylan (*Cinnamomum verum* J.Presl). Il possède une large activité anti-infectieuse qui agit efficacement sur les bactéries, les champignons, les virus et les parasites, quel que soit leur emplacement. En plus de son action stimulante sur le système nerveux sympathique, il stimule également les muscles lisses (comme les contractions utérines et le péristaltisme), les sécrétions digestives et la circulation périphérique. Il est également connu pour son effet thermogène.

La toxicité des aldéhydes aromatiques par voie interne est faible aux doses thérapeutiques. Cependant, ils peuvent être fortement dermocaustiques, ce qui signifie qu'ils peuvent provoquer des irritations cutanées importantes. Par conséquent, les huiles essentielles contenant des aldéhydes aromatiques doivent être diluées dans une huile végétale avant leur application, à une proportion n'excédant pas 10%. Il est important de noter que ces molécules ne doivent pas être utilisées pour des diffusions atmosphériques [2].

IV.4.4. Acides

Les acides sont un groupe de molécules présentes dans les huiles essentielles, bien que souvent en faible quantité. Ils regroupent des structures moléculaires variées, notamment des acides gras insaturés ou mono-insaturés, des acides terpéniques insaturés

et des acides aromatiques. Certains acides sont très hydrosolubles, ce qui explique leur faible présence dans les huiles essentielles, mais ils peuvent néanmoins contribuer de manière significative à leur activité. Les acides les plus puissants anti-inflammatoires connus se trouvent parmi ces molécules.

L'acide salicylique est l'un des acides aromatiques les plus connus. Il est présent, par exemple, dans l'huile essentielle de gaulthérie (*Gaultheria procumbens* L.), où il peut représenter jusqu'à 99% de la composition sous forme de salicylate de méthyle. Cette forme méthylée agit comme une forme "retard", libérant de l'acide salicylique par voie métabolique. Il possède des propriétés anti-inflammatoires, analgésiques et antiagrégantes plaquettaires. Son mécanisme d'action implique l'inhibition de la synthèse de certaines prostaglandines.

IV.4.5. Esters

Les esters, quant à eux, sont principalement des molécules ayant des effets spasmolytiques musculotropes et neurotropes. Ils peuvent agir à différents niveaux, tels que le contrôle central, les médiateurs et les récepteurs musculaires. Ils présentent également une activité anti-inflammatoire. L'activité antispasmodique des esters dépend de la nature de l'acide et de l'alcool qui les composent. Le nombre de carbones de l'acide d'origine influence l'intensité de cette activité, qui augmente de l'acide formique (un atome de carbone) à l'acide benzylique (sept carbones) puis diminue au-delà de sept atomes de carbone. Le tropisme de l'ester dépend de la nature de l'alcool. Les alcools sesquiterpéniques orientent l'activité de l'ester vers la sphère génitale et la zone métabolique basse, tandis que les alcools monoterpéniques sont liés à la sphère cardiaque et à la zone métabolique haute. Les alcools non-terpéniques favorisent une affinité pour la zone céphalique.

Les esters ne présentent de toxicité qu'à des doses élevées. Les formiates peuvent provoquer des tachycardies, tandis que les acétates peuvent être épiléptogènes. L'utilisation prolongée d'huiles riches en esters peut avoir un effet desséchant sur la peau,

il est donc recommandé de les diluer dans une huile végétale. Des réactions d'hypersensibilité peuvent se produire chez les personnes régulièrement exposées, telles que les distillateurs, les masseurs ou les personnes utilisant fréquemment ces huiles [2] [28]. Il est important de se poser des questions sur la libération de l'acide constitutif lors de leur métabolisme, car sa toxicité peut s'avérer bien plus élevée que celle de l'ester lui-même.

- Acide en C₁:

Le groupe des acides en C₁ est représenté uniquement par l'acide formique. Il est le plus souvent lié au géraniol sous forme de formiate de géranyle ou au citronellol sous forme de formiate de citronnelyle. On retrouve ces deux composés dans l'huile essentielle de géranium rosat (*Pelargonium graveolens* L'Hér.), qui est utile dans les spasmes solaires et pour soulager les contractures musculaires.

- Acide en C₂:

Il n'y a qu'un seul représentant pour le groupe des acides en C₂, l'acide acétique. Cependant, il peut être lié à un grand nombre d'alcools. Tous les acétates ont une forte affinité pour la sphère vésiculaire.

L'acétate de linalyle est le plus courant parmi les acétates. Il est reconnu pour ses vertus apaisantes et est présent en grande quantité dans l'huile essentielle de lavande officinale (*Lavandula angustifolia* Mill.) ainsi que dans celle des lavandins, connues pour leurs propriétés apaisantes. On le retrouve également en quantité significative dans l'huile essentielle de petit grain bigaradier (*Citrus aurantium* L. *ssp aurantium*), qui a des propriétés variées : elle est calmante, combat les palpitations cardiaques et agit contre les colites spasmodiques. Il est également présent dans l'huile essentielle d'Ylang-ylang (*Cananga odorata* (Lam.) Hook.f. & Thomson) [28].

L'acétate de bornyle est très présent dans l'huile essentielle de sapin de Sibérie (*Abies sibirica* Ledeb.), ainsi que dans celle de romarin à verbénone (*Rosmarinus officinalis* L. ct verbénone) et d'épinette noire (*Picea mariana* Mill.). Cet ester a des

propriétés antispasmodiques douces et est utile, par exemple, dans les cas de toux sèches [2].

Les acétates de terpinyle et de terpinéyle sont principalement actifs comme antispasmodiques dans le système digestif. Mentionnons également l'acétate de myrtényle, qui a une action antispasmodique avec un tropisme thoracique et abdominal, ainsi qu'une action sympatholytique. L'acétate de menthyle est principalement présent dans les tiges de menthe poivrée (*Mentha x piperita* L.) et est un puissant antispasmodique digestif. L'acétate de benzyle, qui a une forte activité antispasmodique, se trouve dans l'huile essentielle d'ylang-ylang (*Cananga odorata* (Lam.) Hook.f. & Thomson). L'acétate d'eugényle est présent dans le clou de girofle (*Syzygium aromaticum* L.).

- Acides en C₃ et C₄:

Ce groupe comprend les butyrates, propionates, isobutyrate et méthacrylates, qui sont également de bons antispasmodiques.

- Acides en C₅:

Trois acides en C₅ sont représentés : l'acide angélique, l'acide tiglique et l'acide isovalérique. Ils forment également des acétates antispasmodiques [28].

- Acides en C₇:

Les benzoates, salicylates et anthranoylates ont l'activité antispasmodique la plus forte parmi les esters. Le benzoate de benzyle fait partie des esters antispasmodiques de l'huile essentielle d'ylang-ylang (*Cananga odorata* (Lam.) Hook.f. & Thomson). Il apporte également un effet antalgique particulièrement intéressant, notamment dans la gestion des douleurs liées aux métastases osseuses, où l'effet sédatif de l'huile essentielle est également bénéfique [28]. Ainsi, l'huile essentielle d'ylang-ylang devient un complément efficace aux médicaments morphiniques. Le salicylate de méthyle, déjà mentionné pour décrire l'acide salicylique, est un puissant analgésique qui agit également sur les spasmes coronariens.

- Acides en C₉ et C₁₀:

Ces molécules ont une activité antispasmodique, mais elle est moins prononcée que celle des esters en C₇.

Les esters ont peu d'effet anti-infectieux, à l'exception des cinnamates (C₉) qui sont efficaces contre les infections respiratoires et urinaires chroniques [28].

IV.4.6. Éthers

IV.4.6.1. Phénols méthyl-éthers

Les phénols méthyl-éthers sont principalement dérivés de la voie des phénylpropanoïdes et partagent des propriétés similaires aux esters, mais de manière plus prononcée. Ils agissent comme des antispasmodiques majeurs en agissant sur les muscles et les nerfs, et ils ont des effets équilibrants sur le système nerveux. De plus, ils présentent des propriétés antalgiques, antiallergiques et anti-inflammatoires pour certains d'entre eux (comme l'estragole et le -c). Certains phénols méthyl-éthers ont également une activité antibactérienne et antivirale.

Un exemple notable est l'estragole, également appelé chavicol méthyl-éther, qui est le principal constituant de l'huile essentielle d'estragon (*Artemisia dracunculus* L.). Il est reconnu pour son efficacité dans le soulagement des douleurs liées aux dysménorrhées, ainsi que dans les douleurs spasmodiques digestives et les toux spasmodiques. L'estragole présente également une activité anti-inflammatoire.

L'anéthole, présent dans l'anis vert (*Pimpinella anisum* L.), possède des propriétés similaires à l'œstrogène.

La toxicité des phénols méthyl-éthers est généralement réduite par rapport aux phénols en raison de la méthylation de la fonction phénolique. Ils sont généralement bien tolérés, bien que des toxicités nerveuses et respiratoires (tels que l'obnubilation, la stupéfaction, l'atonie, la baisse de la température centrale, voire le coma) aient été rapportées en cas d'utilisation abusive des huiles essentielles correspondantes, mais elles

ne surviennent pas lors d'une utilisation normale. Une toxicité chronique peut se manifester par une perte de poids, en particulier pendant la croissance. Il est important de noter que le trans-anéthole, présent en quantités parfois importantes dans les huiles essentielles, est beaucoup moins neurotoxique que le cis-anéthole qui peut se former pendant le stockage des huiles essentielles. Par conséquent, il est recommandé de prendre des précautions particulières lors du stockage des huiles essentielles.

Certaines molécules, comme la β -asarone, sont considérées comme stupéfiantes et peuvent également provoquer des avortements [2].

IV.4.6.2. Éthers-oxydes

Les éthers-oxydes partagent les propriétés des phénols méthyl-éthers, à partir desquels ils sont biochimiquement dérivés. Ils agissent comme des analgésiques et des antispasmodiques lorsqu'ils sont utilisés en application externe. Par voie orale et aux doses recommandées, ces molécules ont généralement un effet tonifiant, mais elles peuvent devenir stupéfiantes voire toxiques à des doses plus élevées. Tout comme les phénols méthyl-éthers, leur activité antibactérienne suit la loi du « tout ou rien ». De plus, ils présentent une activité antivirale et antiparasitaire.

La myristicine, présente dans la muscade (*Myristica fragrans* Houtt.), est utilisée pour prévenir les contractures musculaires et les douleurs musculaires avant un effort physique. Cependant, à des doses élevées, elle peut entraîner des hallucinations, des crises convulsives et même la mort en cas d'intoxication sévère. Elle est également abortive.

L'apiole, présente dans plusieurs plantes de la famille des Apiaceae, agit comme un spasmolytique, un emménagogue et un vasodilatateur. À forte dose, elle peut cependant provoquer une phase d'excitation suivie d'un état similaire à l'ivresse alcoolique. Comme la myristicine, elle a des propriétés abortives [2] [28].

IV.4.7. Cétones

Les cétones ont un effet significatif sur l'organisme, pouvant être à la fois bénéfique et néfaste. Elles sont particulièrement utiles pour favoriser la cicatrisation au niveau cutané et muqueux, notamment dans les cas de brûlures, d'escarres, de plaies et d'ulcères. De plus, elles contribuent à limiter la formation excessive de tissu conjonctif lors du processus de cicatrisation, notamment dans le cas des cicatrices chéloïdes. Certaines β -diones sont également efficaces pour résorber les hématomes, comme c'est le cas de l'italidione présente dans l'immortelle (*Helichrysum italicum*).

Les cétones ont également une activité mucolytique, bénéfique notamment pour les affections respiratoires et les problèmes liés à la sphère génitale féminine. Par exemple, le romarin à verbénone est utilisé dans ce contexte. Leur activité lipolytique peut également être utile pour réduire les accumulations de graisse sous-cutanée.

Leur action sur les bactéries et les virus est limitée, mais elles sont plus efficaces contre les parasites, notamment les helminthes.

Certaines cétones, comme la menthone présente dans les menthes, et la carvone présente dans la menthe verte (*Mentha spicata*) et le carvi (*Carum carvi*), ont une bonne activité cholagogue et cholérétique. Cependant, il convient de souligner que la pulégone présente dans la menthe pouliot (*Mentha pulegium*) est hépatotoxique.

L'effet des cétones sur le système nerveux central dépend de la dose. À très faible dose, elles ont un effet stimulant, sympathicotonique et cardiotonique. À des doses légèrement plus élevées, elles ont un effet calmant, sédatif et hypothermisant. Au-delà d'un certain seuil, elles peuvent avoir des effets abortifs, épileptiques, neurotoxiques et stupéfiants. À fortes doses, elles peuvent provoquer des convulsions, un coma et entraîner rapidement le décès.

La neurotoxicité des cétones est principalement attribuée à leur action lipolytique, qui entraîne la destruction de la gaine de myéline et perturbe le fonctionnement électrique des neurones.

Il est important de noter que la toxicité des cétones est principalement observée lorsqu'elles sont absorbées par voie orale, mais également par voie anale. Il est donc recommandé de les éviter chez les enfants, les femmes enceintes et les personnes présentant un risque épileptique. Même à des doses modérées, une utilisation prolongée des cétones nécessite également une certaine prudence.

En plus des composés mentionnés, le camphre (ou bornéone) est un autre exemple de cétones. Il possède des propriétés antiseptiques pulmonaires et mucolytiques, et il est utilisé pour soulager les contractures musculaires et les tendinites en raison de son action antalgique et relaxante sur les fibres musculaires, qu'elles soient lisses ou striées [2].

IV.4.8. Oxydes terpéniques

Les oxydes terpéniques sont des composés fréquemment présents dans les huiles essentielles. Ils ont la capacité de stimuler les glandes exocrines, comme par exemple le 1,8-cinéole qui agit sur les glandes à mucine et se trouve notamment dans l'huile essentielle d'eucalyptus globuleux (*Eucalyptus globulus* Labill.). Cette huile essentielle est utilisée en application cutanée pour ses propriétés expectorantes, mais elle doit être évitée chez les personnes asthmatiques, car le 1,8-cinéole peut provoquer un assèchement et une irritation des voies respiratoires. Il est également recommandé de ne pas l'utiliser en diffusion atmosphérique.

Bien que les oxydes terpéniques présentent une activité antibactérienne parfois significative, elle est souvent irrégulière, ce qui limite leur intérêt dans ce domaine. Certains oxydes ont toutefois une bonne activité antivirale et antiparasitaire. Par exemple, l'ascaridol est très actif contre les ascaris, mais son utilisation est restreinte en raison de sa neurotoxicité et de sa toxicité hépatique [2].

IV.4.9. Lactones

Les lactones, principalement les lactones sesquiterpéniques, ont une importance thérapeutique particulière. Elles possèdent des propriétés mucolytiques et expectorantes plus puissantes que les cétones, ainsi qu'un pouvoir hépatostimulant et antispasmodique. De plus, les lactones ont des propriétés anti-infectieuses.

Il convient de noter que les lactones peuvent présenter une toxicité cutanée sous la forme d'allergies, parfois marquées par des dermatites papuleuses. Par voie orale, elles peuvent être neurotoxiques au-delà d'une certaine dose.

Il est important de souligner que cette toxicité doit être relativisée, car les concentrations de lactones dans les huiles essentielles utilisées sont généralement inférieures à 3%.

IV.4.10. Coumarines

Les coumarines, bien que présentes en faible quantité et dans un nombre restreint d'huiles essentielles, possèdent des effets puissants. Elles ont une affinité particulière pour le système nerveux, conférant aux huiles essentielles qui les contiennent des effets inhibiteurs et sédatifs marqués. Par exemple, l'huile essentielle de lavande sauvage (*Lavandula angustifolia* Mill.), obtenue par une distillation prolongée qui entraîne généralement les coumarines en fin de processus, induit un sommeil profond et réparateur.

Les coumarines ont également une activité hypotensive qui résulte de leur effet sédatif sur le système nerveux central, se traduisant par une influence sur la régulation de la pression artérielle.

Elles présentent également des propriétés anticoagulantes significatives, agissant sur différents facteurs de la coagulation : réduction de la prothrombine et de son activation, diminution de l'activité de la thrombokine, diminution de l'activité du facteur IX de coagulation et antagonisme avec la vitamine K au niveau des microsomes hépatiques.

Certaines coumarines ont également une action sur les capillaires, ce qui peut être bénéfique dans certains troubles circulatoires périphériques tels que la couperose, les hémorroïdes et les hématomes. La posologie et la voie d'administration dépendront du trouble spécifique. Cependant, il convient d'être prudent lors de l'utilisation d'huiles essentielles contenant des coumarines chez les personnes suivant un traitement anticoagulant (comme les AVK ou l'aspirine).

Les furocoumarines et les pyrocoumarines sont photosensibilisantes et phototoxiques. Par conséquent, les huiles essentielles et les essences qui en contiennent ne doivent pas être appliquées sur la peau avant une exposition au soleil. Sous l'effet des rayons ultraviolets, elles stimulent la production de mélanine et présentent un risque carcinogène significatif en se liant à l'ADN. On les retrouve notamment dans les essences issues de l'épicarpe (zeste) des agrumes (comme le bergaptène, par exemple). Certains produits sont désormais commercialisés après avoir été traités pour éliminer ces furocoumarines et sont qualifiés de "sans furocoumarines". L'objectif de ce type de traitement est de préserver les propriétés et les qualités d'une huile essentielle tout en réduisant au maximum sa toxicité, ce qui permet d'en élargir les utilisations [29].

IV.4.11. Phtalides

Les phtalides sont une famille de composés chimiques étroitement liée aux coumarines, bien qu'elles aient une origine biochimique différente.

Ces substances sont des stimulants puissants de la détoxification hépatique et de la fonction hépatopancréatique. Les huiles essentielles contenant des phtalides sont utilisées pour traiter des pathologies associées à une insuffisance de la fonction exocrine hépatopancréatique.

Par exemple, elles peuvent être administrées par voie orale dans le traitement du psoriasis.

En agissant sur les dépôts de lipofuscine, les phtalides ont la capacité d'éclaircir les taches pigmentaires présentes sur la peau.

Les phtalides présentent également une activité antiparasitaire intestinale significative, ce qui les rend particulièrement intéressantes en raison de leur faible toxicité aux doses thérapeutiques.

Enfin, certains phtalides sont réputés pour leurs propriétés aphrodisiaques.

Les principales huiles essentielles contenant des phtalides sont celles de céleri (*Apium graveolens* L.), qui est un puissant détoxifiant hépatique, éclaircissant cutané, aphrodisiaque et antibactérien, ainsi que celle de livèche (*Levisticum officinale* W.D.J.Koch), qui contient plus de 70% de phtalides et qui est un agent hépatoprotecteur majeur [2].

IV.4.12. Composés azotés et soufrés

Les composés azotés sont rarement présents dans les huiles essentielles, et leur activité thérapeutique est généralement indétectable. Cependant, ce sont ces composés qui confèrent l'odeur caractéristique à certaines huiles essentielles.

Les composés soufrés, quant à eux, sont généralement présents en petites quantités dans les huiles essentielles. Cependant, dans certains cas, ils peuvent être présents en quantités significatives. Par exemple, des plantes de la famille des Liliaceae telles que l'oignon (*Allium cepa* L.) et l'ail (*Allium sativum* L.) contiennent des di- et trisulfides qui sont des agents antibactériens et antiparasitaires majeurs. Il convient toutefois de noter que ces composés peuvent causer des irritations cutanées.

Les composés azotés sont donc peu fréquents et généralement inactifs du point de vue thérapeutique dans les huiles essentielles, mais ils contribuent à leur parfum distinctif. Les composés soufrés sont présents en quantités variables et peuvent avoir des propriétés antibactériennes et antiparasitaires, mais ils peuvent également provoquer des irritations cutanées [2].

CHEMOTYPE ET AROMATHERAPIE

Depuis des milliers d'années, les plantes aromatiques et les huiles essentielles ont été utilisées par l'humanité à des fins thérapeutiques. Au fil des siècles, notre connaissance de leurs propriétés s'est améliorée de manière empirique. Aujourd'hui, grâce aux avancées des techniques d'analyse, nous pouvons obtenir une compréhension détaillée de la composition chimique de chaque extrait. Ce progrès a permis de mieux comprendre l'activité des huiles essentielles, ce qui a considérablement influencé la pratique de l'aromathérapie.

Comme nous l'avons expliqué précédemment, l'étude systématique de la composition chimique des huiles essentielles a révélé leur variabilité et a donné naissance à la notion de chémotype. Cette évolution soulève naturellement des questions quant aux conséquences pratiques de ces variations dans l'utilisation des huiles essentielles.

Ces conséquences diffèrent selon le domaine d'utilisation. Par exemple, pour une utilisation en parfumerie, une huile essentielle peut perdre une partie de son activité biologique tant que ses propriétés sensorielles, notamment son odeur, restent inchangées. En revanche, pour une huile essentielle reconnue pour son activité antibactérienne, des variations de sa composition chimique pouvant affecter son odeur ou sa couleur peuvent être sans conséquence si son efficacité thérapeutique reste intacte. Cette deuxième partie porte donc sur les implications de la notion de chémotype dans l'utilisation thérapeutique des huiles essentielles, c'est-à-dire dans le domaine de l'aromathérapie.

I. L'aromathérapie

I.1. Généralités

L'aromathérapie consiste à utiliser les fractions aromatiques des plantes (essences et huiles essentielles) à des fins thérapeutiques. Ces utilisations peuvent se faire par voie interne, cutanée ou par inhalation. Elle se distingue de la phytothérapie, qui utilise l'ensemble des éléments de la plante ou d'une partie de la plante. Cette distinction est importante, car la phytothérapie utilise tous les composés chimiques présents dans la plante, tandis que les huiles essentielles ne contiennent que la fraction lipophile de la

plante, mais à une concentration beaucoup plus élevée que dans la plante dans son ensemble.

Il convient de ne pas confondre l'aromathérapie avec d'autres utilisations des huiles essentielles. L'aromatologie utilise les huiles essentielles à des fins de bien-être plutôt qu'à des fins thérapeutiques. L'aromachologie, quant à elle, étudie l'impact des odeurs sur la psychologie et le comportement. Cependant, des études récentes suggèrent que les odeurs pourraient avoir des effets physiologiques, y compris sur la peau, et pas uniquement sur le plan psychologique. Toutefois, les mécanismes d'action précis restent à confirmer. Il convient également de noter qu'il existe une différence entre l'approche anglo-saxonne de l'aromathérapie, qui se limite généralement à l'utilisation externe (applications cutanées et inhalation) et vise principalement à obtenir des effets comportementaux et de bien-être, et l'approche française, qui utilise toutes les voies d'administration et a des ambitions thérapeutiques plus prononcées [30].

En aromathérapie, une grande importance est accordée à l'origine de l'huile essentielle. Pour garantir la meilleure qualité, il est essentiel d'identifier clairement la plante et son environnement. La récolte doit être effectuée dans des conditions optimales et au moment opportun. Seuls certains procédés d'extraction, tels que l'hydrodistillation, l'entraînement à la vapeur et l'expression, sont reconnus pour une utilisation thérapeutique des huiles essentielles. Ce point est crucial car il peut influencer la qualité de l'extrait obtenu. Les conditions de conservation doivent également être contrôlées afin de garantir la stabilité maximale de l'huile essentielle dans le temps.

I.2. Voie d'administration des huiles essentielles

Les principales voies d'administration des huiles essentielles sont la voie orale, la voie rectale, la voie cutanée et la voie respiratoire. Parfois, elles peuvent également être utilisées par voie vaginale. Le choix de la voie d'administration dépendra de différents critères, tels que la pathologie du patient (nature du trouble, localisation, âge, etc.) et les caractéristiques des huiles essentielles utilisées (solubilité, saveur, dermocausticité, etc.).

- **Voie orale:**

La voie orale est facile à mettre en œuvre et généralement bien tolérée par les patients. Les huiles essentielles doivent être administrées par voie orale avec un support solide (comprimé neutre, morceau de sucre, gélule, capsule, etc.) ou liquide (solution, sirop, etc.). Certaines huiles végétales et le miel peuvent également être utilisés.

Il convient de noter que la voie orale n'est pas adaptée à toutes les huiles essentielles, car certaines peuvent être toxiques. La posologie habituelle est d'une à deux gouttes par prise, et le nombre de prises par jour est déterminé en fonction de l'objectif du traitement et de la toxicité de l'huile essentielle. La durée du traitement varie généralement d'une semaine à dix jours, mais dans le cas d'un traitement chronique, des périodes d'interruption peuvent être prévues. Il est recommandé de prendre les huiles essentielles pendant les repas afin de réduire les effets indésirables gastro-intestinaux, et l'utilisation de gélules gastrorésistantes peut être envisagée.

- **Voie cutanée:**

La voie cutanée est l'une des voies les plus couramment utilisées. Bien que certaines huiles essentielles puissent être appliquées pures, il est conseillé de les diluer, par exemple dans une huile végétale, avant de les appliquer sur la peau. Cette dilution est essentielle pour les huiles essentielles réputées dermocaustiques, notamment celles riches en phénols et en aldéhydes aromatiques. Il est également important de noter que l'application d'huiles essentielles contenant des furocoumarines ne doit pas être suivie d'une exposition au soleil, car cela peut provoquer une photosensibilisation de la peau pendant au moins huit heures [28].

Les huiles essentielles peuvent être incorporées dans des gels, des pommades ou être solubilisées pour des bains aromatiques. La posologie et les concentrations d'utilisation dépendront de la toxicité de chaque huile essentielle, tout comme pour la voie orale.

L'action recherchée peut être à la fois locale (sur la peau), régionale (sur les muscles, les articulations, les organes) ou systémique (sur le système nerveux). Les huiles

essentielles sont composées de petites molécules lipophiles qui traversent facilement la barrière cutanée et pénètrent rapidement dans la circulation générale (environ dix minutes). Il est donc important de s'assurer qu'il n'y a pas de risque de surdosage lorsqu'on administre simultanément des huiles essentielles par voie orale et par voie cutanée. Bien que les accidents soient rares, il existe un risque d'intoxication générale par voie cutanée.

Les huiles essentielles peuvent également favoriser l'absorption cutanée, ce qui peut être exploité à des fins thérapeutiques.

▪ **Voie pulmonaire:**

La voie pulmonaire permet à la fois une action locale et systémique, tout comme la voie cutanée. Il existe quatre modes d'administration par voie pulmonaire :

- Les inhalations humides : L'huile essentielle est placée dans un inhalateur avec de l'eau chaude. Le patient respire la vapeur chargée en huile essentielle pendant environ dix minutes.
- Les inhalations sèches : Quelques gouttes d'huile essentielle sont déposées sur un support, tel qu'un mouchoir, que l'on respire.
- Les aérosols : Ils permettent de respirer l'huile essentielle en suspension dans l'air sous forme de microgouttelettes, atteignant ainsi les voies respiratoires profondes. Cette technique est réservée à la prescription médicale.
- La diffusion atmosphérique : Elle permet d'améliorer la qualité de l'air en utilisant les propriétés antimicrobiennes des huiles essentielles. La diffusion des arômes agréables et la pénétration systémique des molécules aromatiques procurent un effet relaxant et anti-stress. Il est recommandé d'utiliser un appareil de diffusion sans chauffage ou à chauffage doux pour ne pas altérer les huiles essentielles.

Il est important de noter que toutes les huiles essentielles ne conviennent pas à la voie pulmonaire, car certaines peuvent être irritantes pour les voies respiratoires et les yeux. C'est notamment le cas des huiles essentielles riches en phénols et en aldéhydes aromatiques. Il est recommandé d'éviter l'utilisation de la voie pulmonaire chez les personnes asthmatiques.

Bien que les huiles essentielles puissent être utilisées pour assainir l'air ambiant, leur diffusion dans une pièce ne signifie pas qu'elles agissent comme des agents dépolluants. En réalité, certaines molécules organiques présentes dans l'air (composés organiques volatils) peuvent être allergènes voire polluantes.

- **Voie rectale:**

La voie rectale permet une bonne diffusion générale des principes actifs, y compris au niveau pulmonaire. Elle permet une action locale ou systémique, contournant le passage par le foie, ce qui peut être intéressant pour les huiles essentielles hépatotoxiques. Elle permet également d'administrer des doses plus importantes que par voie orale. C'est une alternative utile, par exemple, pour les patients qui n'apprécient pas le goût des huiles essentielles, qui ont du mal à avaler des gélules ou qui ont une mauvaise tolérance gastrique. Les huiles essentielles sont incorporées dans des suppositoires.

Cependant, la voie rectale doit être évitée en cas de maladie hémorroïdaire, de rectocolite hémorragique ou de maladie de Crohn. Il convient également d'être prudent lors de l'utilisation d'huiles essentielles riches en phénols irritants ou en cétones neurotoxiques.

- **Voie vaginale:**

La voie vaginale est utilisée exclusivement pour une action locale anti-infectieuse. Les huiles essentielles sont incorporées dans des ovules gynécologiques.

I.3. Propriétés reconnues des huiles essentielles

Les huiles essentielles possèdent un large éventail de propriétés reconnues pour leurs applications en médecine humaine. Bien que cette liste ne soit ni exhaustive ni détaillée, voici les principales propriétés des huiles essentielles :

- Propriétés anti-infectieuses :
 - Antibactériennes
 - Antivirales
 - Antifongiques
 - Antiparasitaires
 - Antiseptiques

- Propriétés insectifuges et insecticides
- Propriété anti-inflammatoire
- Propriété antihistaminique
- Propriété immunorégulatrice
- Propriétés anticatarrhales :
 - Expectorantes
 - Mucolytiques

- Propriétés neurotropes :
 - Antispasmodiques
 - Anti-arythmiques
 - Antalgiques, analgésiques et anesthésiques
 - Calmantes, hypnotiques et anxiolytiques

- Propriétés endocrinorégulatrices
- Propriétés vasculotropes :
 - Hyperémiante
 - Phlébotonique et lymphotonique
 - Anticoagulante et fibrinolytique
 - Antihématome et hémostatique
 - Hypotensive

- Propriétés antitumorales
- Propriétés digestives :

- Eupeptiques et carminatives
- Cholagogues et cholérétiques
- Hépatostimulantes et hépatoprotectrices

- Propriétés cicatrisantes
- Propriétés analeptiques
- Propriétés thermorégulatrices

I.4. Toxicité des huiles essentielles

Il est important de prendre en compte la toxicité potentielle des huiles essentielles, même si elles sont largement utilisées et demandées par le public en raison de leur caractère naturel. Les huiles essentielles ne sont pas des produits sans danger et présentent certains risques de toxicité. Les pharmaciens doivent veiller à ce que leurs patients utilisent correctement les huiles essentielles et respectent les précautions d'emploi et les éventuelles contre-indications.

Les huiles essentielles peuvent entraîner différents types de toxicité, notamment :

- Hépatotoxicité
- Dermotoxicité (irritations, brûlures, hypersensibilité, phototoxicité) et irritation des muqueuses exposées
- Neurotoxicité (dépression ou excitation du système nerveux central, effet stupéfiant, convulsions)
- Néphrotoxicité
- Effets tératogènes et abortifs
- Propriétés carcinogènes
- Hypersensibilité

Les cas d'intoxications aiguës graves restent relativement rares et sont souvent liés à l'ingestion accidentelle d'huiles essentielles par de jeunes enfants. La toxicité chronique la plus courante en aromathérapie est associée à l'utilisation prolongée d'huiles essentielles phénoliques, qui peuvent être dangereuses pour les cellules hépatiques à long terme.

L'hypersensibilité à un ou plusieurs composés volatils peut se produire chez les personnes régulièrement exposées dans le cadre professionnel.

Certaines huiles essentielles, en raison de leur toxicité ou des utilisations détournées possibles, sont réglementées et réservées au monopole pharmaceutique.

II. INFLUENCE DU CHEMOTYPE

Les huiles essentielles utilisées à des fins médicales sont maintenant chémotypées, ce qui signifie qu'elles respectent des normes de composition chimique afin d'assurer une certaine homogénéité entre les différents lots provenant de cultures à travers le monde. Cette approche garantit la reproductibilité des propriétés associées à chaque huile essentielle. L'étude systématique de la composition chimique permet de distinguer des sous-groupes chimiques au sein de certaines huiles essentielles. Lorsque les différences sont significatives et pertinentes pour l'utilisation de l'huile essentielle, ces sous-groupes, appelés chémotypes, sont également définis et peuvent faire l'objet de normes.

Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, de nombreux facteurs peuvent influencer la composition d'une huile essentielle. Ce chapitre vise à démontrer que ces variations peuvent avoir des implications dans l'utilisation thérapeutique des huiles essentielles et ne peuvent parfois pas être négligées. De plus, l'existence de ces variations influence également les pratiques agricoles et le choix des matières premières.

II.1. Dans le choix des matières premières.

La menthe verte (*Mentha spicata* L.) est un exemple illustrant la variabilité de la composition d'une huile essentielle en fonction du chémotype. Cette plante est cultivée dans différents pays et continents, tels que l'Amérique du Sud, l'Amérique du Nord, l'Europe et l'Asie. Dans la plupart des cas, la carvone est le composant principal, suivi du limonène, indépendamment du pays de culture ou de la période de récolte. Cependant, la proportion de chaque molécule peut varier de manière significative entre les échantillons. La norme ISO 3033-1:2005 relative à l'huile essentielle de *Mentha spicata* L. établit des

pourcentages réglementaires de carvone entre 60 et 70% et de limonène entre 9 et 15%. En revanche, le linalol est généralement absent ou présent en quantités très faibles dans les échantillons d'huile essentielle de menthe verte, et sa teneur n'est pas spécifiée par la norme ISO.

Il existe cependant des populations de menthe verte ayant une composition chimique radicalement différente, notamment dans les plantes sauvages. Par exemple, une étude menée en Grèce du Nord a identifié un chémotype distinct avec une proportion de linalol allant de 85 à plus de 94% de l'huile essentielle selon les saisons. Le limonène y est présent en quantité négligeable et la carvone est absente.

La présence de carvone confère à la menthe verte des propriétés stimulantes, antispasmodiques, antinociceptives et carminatives. Cependant, comme la plupart des cétones terpéniques, elle est neurotoxique. Selon l'énantiomère considéré, elle peut donner un parfum de menthe verte ou un parfum plus herbacé rappelant la graine de carvi. Une huile essentielle sans carvone mais contenant environ 90% de linalol aurait une odeur très différente, celui-ci ayant un parfum caractéristique de muguet. De plus, son activité est également différente, le linalol étant sédatif, anxiolytique, anti-inflammatoire, antiseptique, antiviral, antifongique et également antalgique. Il convient de noter que le linalol est également potentiellement allergisant [31].

Cet exemple met en évidence la nécessité d'une étude approfondie de la composition chimique de l'huile essentielle, même lorsque l'on a l'assurance que la plante appartient à l'espèce désirée. Dans le cas présent, bien que l'activité de l'huile essentielle soit très différente, il n'y a a priori pas de risque d'intoxication. Cependant, il est important de noter que cela peut différer pour d'autres espèces.

La méconnaissance des chémotypes pourrait expliquer les intoxications liées à la consommation d'Absinthe à la fin du XXe siècle en France. À cette époque, l'Absinthe, un apéritif préparé à base d'absinthe (*Artemisia absinthium* L.), est devenu très populaire en raison de la chute de la production de vin et de la baisse de son prix. Cependant, cette

baisse de prix s'est accompagnée d'une baisse de qualité, avec la présence de méthanol et de sulfate de zinc, contribuant à sa toxicité. Les principaux symptômes de l'absinthisme, tels que la désinhibition, les convulsions et les hallucinations, sont plutôt liés à la présence de thuyone, une cétone monoterpénique, dans la plante.

Des études ont été menées sur la composition des huiles essentielles d'absinthe cultivée à Choisy-le-Roi (Val-de-Marne) et de plantes sauvages des montagnes récoltées à Caussols (Alpes-Maritimes). Les résultats ont montré que l'huile essentielle préparée à partir des plantes cultivées en région parisienne pour la préparation d'apéritifs à base d'absinthe contenait entre 43 et 45% de thuyone. En revanche, les plantes sauvages du sud de la France ne présentaient qu'une teneur en thuyone de 3 à 8,4%. Il est donc légitime de penser qu'en sélectionnant des plantes ayant naturellement une faible teneur en thuyone pour préparer cet apéritif, sa toxicité aurait été considérablement réduite [32].

Un autre exemple concerne l'huile essentielle de tea tree (ou arbre à thé) produite à partir de *Melaleuca alternifolia* Cheel en Australie. La détermination des différentes races chimiques dans cette huile essentielle, basée notamment sur la teneur en 1,8-cinéole et le ratio 1,8-cinéole/terpinèn-4-ol, a transformé sa production. Une seule de ces races chimiques répond aux normes de qualité pour cette huile, avec une teneur en 1,8-cinéole inférieure à 15% et une teneur en terpinèn-4-ol supérieure à 30%, ce dernier composé étant associé à une meilleure efficacité antimicrobienne.

Initialement, la limite de 15% pour le 1,8-cinéole était justifiée par le supposé caractère irritant de cette substance. Cependant, des études ultérieures n'ont pas démontré d'irritation cutanée liée au 1,8-cinéole, remettant en question cette justification. Il a ensuite été avancé que des proportions plus faibles de 1,8-cinéole favoriseraient l'activité antimicrobienne de l'huile essentielle. En réalité, une diminution du 1,8-cinéole est directement liée à une augmentation du terpinèn-4-ol, dont la teneur est liée à l'efficacité antimicrobienne. La production d'huile essentielle à partir d'arbres sauvages ne suffit pas à satisfaire la demande, ce qui a conduit à la culture et à la sélection rigoureuse d'arbres pour augmenter le rendement des feuilles, leur résistance aux parasites et optimiser la

teneur en 1,8-cinéole et en terpinèn-4-ol, en fonction des exigences du marché. Ainsi, la définition de chémotypes pour *Melaleuca alternifolia* Cheel a permis de sélectionner et de produire l'huile essentielle la plus intéressante du point de vue commercial, transformant ainsi la culture et l'exploitation de cette espèce [33].

Une étude menée sur le basilic (*Ocimum basilicum* L.) cultivé dans un jardin botanique au Pakistan a montré des variations significatives de composition chimique de l'huile essentielle entre les saisons (mars, juin, septembre, décembre). Cette étude a également évalué les activités antioxydantes et antimicrobiennes de ces huiles essentielles, révélant que la composition chimique d'un échantillon a un impact significatif sur son activité. Ces variations peuvent donc influencer l'efficacité thérapeutique de l'huile essentielle, notamment pour ses propriétés antimicrobiennes. Ainsi, le choix de la période de récolte de la plante revêt une importance cruciale [34].

Il est également essentiel de préciser l'origine de l'huile essentielle et la période de récolte, notamment dans les études scientifiques. En l'absence de ces informations, il devient impossible d'interpréter les différences entre deux résultats, car plusieurs facteurs clés de variation restent inconnus. Malheureusement, cette précision n'est pas toujours mentionnée dans certaines études. Par exemple, une étude sur l'activité antioxydante de l'huile essentielle d'*Ocimum basilicum* L. ne précise pas la période de récolte, se contentant de mentionner qu'elle provient de feuilles sèches achetées sur un marché en Californie.

Une autre étude menée sur la sauge officinale (*Salvia officinalis* L.) a démontré l'importance de la période de récolte sur le profil chimique de l'huile essentielle. Sa composition chimique varie également de manière significative au fil des saisons. Bien que de nombreux composés chimiques restent conformes aux normes ISO 9909 relatives à cette huile essentielle, certaines molécules dépassent les limites définies à certaines périodes de l'année. Par exemple, la concentration d' α -thuyone, isomère le plus neurotoxique de cette cétone, dépasse le maximum défini (43%) sur les deux sites de culture (environ 46 et 55%) pour les échantillons récoltés en décembre 1999 [35].

Les études citées mettent en évidence la grande variabilité de la composition chimique des huiles essentielles, qui est influencée par de nombreux facteurs externes et qui entraîne des variations d'activité. Il est donc essentiel de prendre en compte ces variations à tous les niveaux de la chaîne, et le choix de la matière première doit être fait en tenant compte de ces variations. Lorsqu'une huile essentielle est utilisée à des fins thérapeutiques, il est légitime de demander un produit dont la qualité est contrôlée et qui répond aux normes garantissant son activité spécifique sans présenter de toxicité inattendue.

En réponse à cette demande croissante et aux enjeux commerciaux associés, les filières de production s'organisent pour sélectionner les plantes et adapter les pratiques agricoles afin d'obtenir les meilleurs résultats possibles.

II.2. Dans le choix en thérapeutique

Lorsqu'il s'agit de choisir une huile essentielle pour une utilisation thérapeutique, il est important de prendre en compte la notion de chémotype. En effet, plusieurs huiles essentielles peuvent provenir de la même plante, mais avoir des profils chromatographiques si différents qu'elles sont considérées comme distinctes. Par exemple, la composition de l'huile essentielle de romarin à cinéole (*Rosmarinus officinalis* L. ct 1,8-cinéole) est probablement plus proche de celle de l'eucalyptus radié (*Eucalyptus radiata* Sieber) que des autres variétés de romarin. Ainsi, deux huiles essentielles issues de la même plante ne peuvent pas nécessairement être substituées l'une à l'autre. En revanche, il peut arriver que deux plantes n'ayant aucun lien entre elles produisent des huiles essentielles très similaires. Par exemple, la gaulthérie couchée (*Gaultheria procumbens* L., Ericaceae) et le bouleau noir (*Betula nigra* L., Betulaceae) produisent tous deux une huile essentielle contenant jusqu'à plus de 99% de salicylate de méthyle.

Il est donc primordial de connaître la notion de chémotype, que ce soit pour le médecin qui prescrit des huiles essentielles, le pharmacien qui les conseille en pharmacie, ou même pour les personnes qui choisissent elles-mêmes leurs huiles essentielles. Les

pharmaciens doivent être en mesure de s'assurer que les consommateurs qui sélectionnent leurs propres huiles essentielles comprennent les enjeux liés à la notion de chémotype.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Fernandez X., Chemat F. *La chimie des huiles essentielles*. Editions Vuibert 2012). 288p.
- [2] Faucon M. *Traité d'aromathérapie scientifique et médicale*. Sang de la terre (2012). 880p.
- [3] Article D4211-13 du Code de la Santé Publique.
- [4] Article 514 bis du Code Général des Impôts.
- [5] Kumar A., Shukla R., Singh P., Prasad C.S., Dubey N.K. *Assessment of Thymus vulgaris L. essential oil as a safe botanical preservative against post harvest fungal infestation of food commodities*. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 9 : 575–580, 2008.
- [6] Furet A., Bellenot D. *Les huiles essentielles dans la protection des cultures: une voie en cours d'exploration*. Institut technique interprofessionnel des plantes médicinales, aromatiques et industrielles (ITEIPMAI). 2013
- [7] Lair P.-Y. *A propos des 26 allergènes de la directive 2003/15/CE*. Thèse pour le diplôme d'état de docteur en Pharmacie. Université de Nantes, 2006.
- [8] Caissard J.C., Joly C., Bergougnoux V., Huguenev P., Mauriat M., Baudino S. *Secretion mechanisms of volatile organic compounds in specialized cells of aromatic plants*. Recent Research Developments in Cell Biology, 2 : 1-15, 2004.
- [9] Svoboda K.P., Svoboda T.G., Syred A. *Secretory structures of aromatic and medicinal plants*. Microscopix Publications (2000). 60p.
- [10] Howard L.. Tomato leaf (non datée, Dartmouth college, Hanover, États-Unis). Photographie en microscopie électronique à balayage. In Ripple Electron Microscope Facility. Disponible sur <http://remf.dartmouth.edu/images/TomatoLeafSEM/tomatoleafsemcatalog.html>
- [11] Duval L. *Les huiles essentielles à l'officine*. Thèse pour le diplôme d'état de docteur en Pharmacie. Université de Rouen, 2012.
- [12] Piochon M. *Étude des huiles essentielles d'espèces végétales de la flore laurentienne : composition chimique, activités pharmacologiques et hémi-synthèse*. Mémoire pour la maîtrise en ressources renouvelables. Université du Québec à Chicoutimi, 2008.

- [13] El Kalamouni C. *Caractérisations chimiques et biologiques d'extraits de plantes aromatiques oubliées de Midi-Pyrénées*. Thèse pour le diplôme de docteur en sciences (sciences des agroressources). Université de Toulouse, 2010.
- [14] Roubaudi L. *Citrus aurantium* L. (Crète, 2014). Photographie dans Tela Botanica. Disponible sur www.tela-botanica.org.
- [15] Guitton Y. *Diversité des composés terpéniques volatils au sein du genre Lavandula : aspects évolutifs et physiologiques*. Thèse pour le diplôme de docteur en sciences (biologie et physiologie végétales). Université de Saint-Etienne, 2010.
- [16] Granger R., Passet J. *Thymus vulgaris spontané de France : Races chimiques et chemotaxonomie*. Phytochemistry, 12 : 1683-1691. 1973.
- [17] Faucon M. *Traité d'aromathérapie scientifique et médicale*. Sang de la terre (2012). 880p.
- [18] Bruneton J. *Pharmacognosie, phytochimie, plantes médicinales*. Eds Tec&Doc (2009). 4ème éd. 1269p.
- [19] Kaul P.N., Bhattacharya A.K., Rajeswara Rao B.R., Syamasundar K.V., Ramesh S. *Volatile constituents of essential oils isolated from different parts of cinnamom (Cinnamomum. zeylanicum Blume)*. Journal of the science of food and agriculture, 83 : 53-55. 2003.
- [20] Figueredo G. *Étude chimique et statistique de la composition d'huiles essentielles d'origans (Lamiaceae) cultivés issus de graines d'origine méditerranéenne*. Thèse pour le diplôme de docteur d'université (chimie organique). Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2007.
- [21] Baser K.H.C., Buchbauer G. *Handbook of essential oils : science, technology and applications*. CRC Press (2009). 1ère éd. 991p.
- [22] Santos-Gomes P.C., Fernandes-Ferreira M. *Organ- and seasonal-dependant variation in the essential oil composition of Salvia officinalis L. cultivated at two different sites*. Journal of agricultural and food chemistry, 49 : 2908-2916. 2001.
- [23] Perry N.B., Anderson R.E., Brennan N.J., Douglas M.H., Heaney A.J., McGimpsey J.A., Smallfield B.M. *Essential Oils from Dalmatian Sage (Salvia officinalis L.) : Variations*

among Individuals, Plant Parts, Seasons, and Sites. Journal of agricultural and food chemistry, 47 : 2048-2054. 1999.

[24] Yayi E., Gbenou J.D., Ahoussi L.A., Moudachirou M., Chalchat J.C. *Ocimum gratissimum L., siège de variations chimiques complexes au cours du développement.* Comptes rendus Chimie, 7 : 1013-1018. 2004.

[25] Zabarar D., Spooner-Hart R.N., Wyllie S.G. *Effects of mechanical wounding on concentration and composition of essential oil from Melaleuca alternifolia leaves.* Biochemical systematics and ecology, 30 : 399-412. 2002.

[26] Kumar N., Shukla R., Chanotiya C.S., Yadav A., Singh A.K., Bagchi G.D. *Effect of Seasons and Drying on the Essential Oil Composition of Leaf in Ocimum kilimandscharicum Guerke.* Journal of essential oil research, 21 : 400-402. 2009.

[27] Sarosi Sz., Sipos L., Kokai Z., Pluhar Zs. Szilvassy B., Novak I. *Effect of different drying techniques on the aroma profile of Thymus vulgaris analyzed by GC-MS and sensory profile methods.* Industrial crops and products, 46 : 210-216. 2013.

[28] Franchomme P., Pénéol D. *L'aromathérapie exactement. Encyclopédie de l'utilisation thérapeutique des huiles essentielles.* Roger Jollois (2001). 445p.

[29] Pengelly A. *The constituents of medicinal plants. An introduction to the chemistry and therapeutics of herbal medicine.* Allen & Unwin (2004). 2ème éd. 2004.

[30] Clarcke S. *Essential chemistry for aromatherapy.* Churchill Livingstone (2009). 2ème éd. 320p.

[31] Znini M., Bouklah M., Majidi L., Kharchouf S., Aouniti A., Bouyanzer A. et al. *Chemical composition and inhibitory effect of Mentha spicata essential oil on the corrosion of steel in molar hydrochloric acid.* International journal of electrochemical science, 6 : 691-704. 2011.

[32] Charabot E., Gatin C.L. *Le parfum chez la plante.* Gaston Doin (1908). 404p.

[33] Meierhenrich U.J., Golebiowski J., Fernandez X., Cabrol-Bass D. *De la molécule à l'odeur. Les bases moléculaires des premières étapes de l'olfaction.* Actualité chimique, 289 : 29-40. 2005.

- [34] Hussain A.I., Anwar F., Sherazi S.T.H., Przybylski R. *Chemical composition, antioxidant and antimicrobial activities of basil (*Ocimum basilicum*) essential oils depends on seasonal variations*. Food chemistry, 108 : 986-995. 2008.
- [35] Santos-Gomes P.C., Fernandes-Ferreira M. *Organ- and seasonal-dependant variation in the essential oil composition of *Salvia officinalis* L. cultivated at two different sites*. Journal of agricultural and food chemistry, 49 : 2908-2916. 2001.