

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Chimique

Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Chimique

Variation de la concentration de l'huile essentielle et de ses constituants majoritaires lors de l'extraction à la vapeur d'eau

Nouara BENSALD et Nesrine ZARROUGUI

Sous la direction de Mr. E.H BENYOUSSEF

Professeur (ENP)

Présenté et soutenu publiquement le : 12/10/2021

Composition du jury :

Présidente	Mme F. MOHELLEBI	Professeur	ENP
Promoteur	Mr E.H BENYOUSSEF	Professeur	ENP
Examinatrice	Mme F. KIES	Maitre de conférences A	ENP
Examinatrice	Mme O. REBAS	Maitre de conférences B	ENP
Invitée	Mme A. GUELLOUR	Docteur	BIOPHARM

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Chimique

Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Chimique

Variation de la concentration de l'huile essentielle et de ses constituants majoritaires lors de l'extraction à la vapeur d'eau

Nouara BENSALD et Nesrine ZARROUGUI

Sous la direction de Mr. E.H BENYOUSSEF

Professeur (ENP)

Présenté et soutenu publiquement le : 12/10/2021

Composition du jury :

Présidente	Mme F. MOHELLEBI	Professeur	ENP
Promoteur	Mr E.H BENYOUSSEF	Professeur	ENP
Examinatrice	Mme F. KIES	Maitre de conférences A	ENP
Examinatrice	Mme O. REBAS	Maitre de conférences B	ENP
Invitée	Mme A. GUELLOUR	Docteur	BIOPHARM

ملخص:

تغير تركيز الزيت الأساسي ومكوناته الرئيسية أثناء الاستخراج بالبخار

يهدف عملنا إلى جمع بيانات من خلال الأعمال السابقة متعلقة بالتركيب الكيميائي والمردود و حركية الاستخراج لأربعة أنواع نباتية مزروعة في الجزائر إكليل الجبل ، الفستق الحلبي ، النعناع الأخضر و الينسون الأخضر. تُستخدم هذه البيانات لنمذجة تطور تركيز الزيت الأساسي و مكوناته الرئيسية في الطور الغازي أثناء الاستخراج ، وهذا من أجل دراسة تأثير بعض العوامل على كمية ونوعية الزيت. أوضحت النتائج أن التباين في التركيب ، والمردود ، و حركية الزيت الأساسي يرجع إلى عدة عوامل داخلية وخارجية. نستنتج أيضًا أن الفرضية التي تعتبر الزيت أساسي شبه مركب وحيد يجب تطبيقها بحذر في حالة حدوث تغيير في التركيب الكيميائي أو الاختلاف بين الثوابت الحركية للمركبات أثناء الاستخراج.

الكلمات المفتاحية: زيت أساسي، *Rosmarinus officinalis* L. ، *Pistacia lentiscus* L. ، *Mentha spicata* L. ، *Pimpinella anisum* L. ، التركيب الكيميائي ، المردود ، حركية الاستخراج ، النمذجة.

Abstract:

Variation of the concentration of the essential oil and its major components during steam extraction

The aim of our study is to collect data from previous works, about the chemical composition, yield and extraction kinetics of four plant species grown in Algeria: Rosemary, Pistachio, Spearmint and Anise. This data is used to model the evolution of the concentration of the essential oil and its major components in the vapour phase during extraction, in order to study the influence of some parameters on the quantity and quality of the oil. The results revealed that the variability of the composition, yield and kinetics of the essential oil is due to several intrinsic and extrinsic factors. We also determined that the assumption that the essential oil is a single pseudo-component should be applied with caution in the case of changes in chemical composition or variation of the kinetic constants of the components during the extraction process.

Keywords: Essential oil, *Rosmarinus officinalis* L., *Pistacia lentiscus* L., *Mentha spicata* L., *Pimpinella anisum* L., chemical composition, yield, extraction kinetics, modeling.

Résumé:

Variation de la concentration de l'huile essentielle et de ces constituants majoritaires lors de l'extraction à la vapeur d'eau

Notre travail a pour objectif de recueillir à partir de travaux antérieurs des données concernant la composition chimique, le rendement et la cinétique d'extraction de quatre espèces végétales cultivées en Algérie : Le Romarin, le Pistachier, la Menthe verte et l'Anis vert. Ces données sont exploitées pour modéliser l'évolution de la concentration de l'huile essentielle et de ses constituants majoritaires en phase vapeur pendant l'extraction, et ceci afin d'étudier l'influence de quelques paramètres sur la quantité et la qualité de l'huile. Les résultats ont montré que la variabilité de la composition, du rendement et de la cinétique de l'huile essentielle est due à plusieurs facteurs intrinsèques et extrinsèques. Nous retenons aussi que l'hypothèse considérant l'huile essentielle comme un pseudo-composé unique est à appliquer avec précaution dans le cas de changement de composition chimique ou de variation entre les constantes cinétiques des composés au cours de l'extraction.

Mots clés : Huile essentielle, *Rosmarinus officinalis* L., *Pistacia lentiscus* L., *Mentha spicata* L., *Pimpinella anisum* L., composition chimique, rendement, cinétique d'extraction, modélisation.

Remerciements

Nous remercions tout d'abord Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la patience et la volonté pour compléter ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude et notre reconnaissance à Monsieur E.H. Benyoussef professeur à l'Ecole Nationale polytechnique pour son soutien, sa patience, sa disponibilité, ses conseils et remarques, et la confiance qu'il nous a accordé au cours de son encadrement.

Nos vifs remerciements s'adressent à Madame F. Mohellebi, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique pour le grand honneur qu'elle nous a fait de présider le Jury de soutenance.

Nous tenons également à remercier Madame F. Kies et Madame O. Rebas, maîtres de conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique, pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce travail.

Nous remercions aussi l'ensemble des enseignants de l'École Nationale Polytechnique et en particulier ceux du département du génie chimique, pour les enseignements et les connaissances qu'ils nous ont transmises tout au long de notre formation.

Nous remercions enfin toute personne ayant contribué de près ou de loin au bon déroulement et la finalisation de notre travail.

Dédicaces

A mes très chers parents,

Qui grâce à leur amour, leurs sacrifices et leurs prières ont fait de moi la personne que je suis aujourd'hui. Qui m'ont toujours encouragé et soutenu tout au long de mon parcours, et qui ont partagé avec moi les moments de joie et de tristesse. Que Dieu vous protège et vous garde en bonne santé, puisse-t-il m'aider pour que je sois à la hauteur de vos espérances.

A ma famille,

A mon cher oncle Hamid, A mes chères tantes Lila, Farida, Fadila et en particulier tante Zahia, et tante Nadia et son mari khalou Nacer. A ma cousine Houda, à tous les membres de ma famille qui m'ont encouragé et aidé moralement et financièrement.

A ma chère grand-mère « Yaya Ouiza »,

Que Dieu, le tout puissant, te protège et te procure logue vie et bonne santé.

A mon binôme Nesrine,

Avec qui j'ai partagé les moments les plus mémorables pendant mes études en spécialité.

A mes chères amies,

Ahlem, Rania, Hind, Hanane et Maria, qui m'ont soutenu moralement et m'ont fait part de leurs conseils.

A toute personne qui m'a aidé et à été présente avec moi tous au long de mon parcours.

Nouara

Dédicaces

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

À mes très chers parents qui n'ont jamais cessé de m'encourager pour entreprendre mes études et atteindre mes objectifs, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études, je les remercie du fond du cœur d'être présents pour moi.

*À mes chères sœurs : **Amina, Yasmine** et mes chers frères : **Anas, Amine** pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,*

*À mon adorable petite sœur **Loudjaine**, qui sait toujours comment procurer la joie et le bonheur pour toute la famille.*

*À ma chère tante **Abla** qui a toujours été à mes côtés tout ce temps et m'a aidée surtout dans les moments difficiles.*

*À ma chère grand-mère « **Djamila** » qui je souhaite une bonne santé.*

*À mes meilleurs amis : **Aya, Salsabil, Amal, Amine, Youcef, Wahab** qui m'ont toujours encouragé, et avec qui j'ai partagé tant de moments mémorables.*

*Sans oublier mon binôme **Nouara** pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.*

À tous ceux que j'aime

Nesrine

Table des matières

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale	20
Chapitre 1 : Généralités sur les huiles essentielles	22
1.1 Définition	23
1.2 Méthodes d'extraction	23
1.2.1 Méthodes conventionnelles	23
1.2.1.1 Distillation par entraînement à la vapeur	23
1.2.1.2 Hydrodistillation	24
1.2.1.3 Expression à froid	25
1.2.1.4 Vapo-diffusion (hydro-diffusion)	25
1.2.1.5 Distillation « sèche »	26
1.2.2 Méthodes innovantes	27
1.2.2.1 Extraction assistée par micro-ondes	27
1.2.2.1.1 L'hydrodistillation assistée par micro-ondes (MAHD)	28
1.2.2.1.2 L'extraction par solvant assistée par micro-ondes (SME)	29
1.2.2.1.3 L'extraction sans solvant assistée par micro-ondes (SFME)	30
1.2.2.1.4 L'hydrodistillation sous pression réduite assistée par micro-ondes (VMHD)	31
1.2.2.1.5 L'hydro-diffusion assistée par micro-ondes et gravité (MHG)	32
1.2.2.1.6 L'entraînement à la vapeur d'eau assisté par micro-ondes (MSD)	32
1.2.2.1.7 L'entraînement à l'air assisté par micro-ondes (CAMD)	33
1.2.2.1.8 L'hydro-diffusion assistée par micro-ondes (MSDf)	34
1.2.2.2 Extraction par fluide super critique (SFE)	35
1.2.2.3 Extraction par liquide pressurisé (PLE)	36
1.2.2.4 Extraction par pervaporation	36
1.2.2.5 Extraction assistée par ultrasons (UAE)	37
1.2.2.6 Extraction par chauffage ohmique	38
1.2.3 Avantages et inconvénients des méthodes d'extraction	38
1.3 Composition des huiles essentielles	40
1.3.1 Les Terpènes	40
1.3.1.1 Les monoterpènes	41
1.3.1.2 Les sesquiterpènes	41

1.3.1.3	Les diterpènes	42
1.3.2	Les Alcools	42
1.3.2.1	Les monoterpénols	42
1.3.2.2	Les sesquiterpénols	43
1.3.2.3	Les diterpénols	43
1.3.2.4	Les Phénols	43
1.3.3	Les Phénols méthyl-éthers	44
1.3.4	Les Oxydes	45
1.3.4.1	Les éthers-oxydes :	45
1.3.4.2	Les oxydes terpéniques	46
1.3.5	Les Aldéhydes	46
1.3.6	Les Esters	47
1.3.7	Les Cétones	47
1.3.8	Les Lactones	48
1.3.9	Les Coumarines	48
1.3.10	Les Composés soufrés	48
1.3.11	Définition du chémotype	49
1.4	Caractéristiques des huiles essentielles	49
1.5	Méthodes d'analyse des huiles essentielles	50
1.6	Conclusion	50
 Chapitre 2 : Travaux antérieurs		52
2.1	Introduction	53
2.2	Présentation des substrats végétaux	53
2.2.1	<i>Rosmarinus officinalis</i> L. (Romarin)	53
2.2.1.1	Origine	53
2.2.1.2	Localisation de l'HE de romarin	54
2.2.1.3	Propriétés physico-chimiques et organoleptiques	55
2.2.1.4	Usages	56
2.2.2	<i>Pistacia lentiscus</i> L. (Pistachier)	56
2.2.2.1	Origine	56
2.2.2.2	Localisation de l'HE dans la plante	57
2.2.2.3	Propriétés physico-chimiques et organoleptiques	58
2.2.2.4	Usages	59
2.2.3	<i>Mentha spicata</i> L. (Menthe verte)	59
2.2.3.1	Origine	59
2.2.3.2	Localisation de l'HE de la menthe	60
2.2.3.3	Propriétés physico-chimiques et organoleptiques	61
2.2.3.4	Usages	62

2.2.4	<i>Pimpinella anisum</i> L. (Anis vert)	62
2.2.4.1	Origine.....	62
2.2.4.2	Propriétés physico-chimiques et organoleptiques	63
2.2.4.3	Usages	64
2.3	Composition chimique et rendement	64
2.3.1	<i>Rosmarinus officinalis</i> L. (Romarin)	64
2.3.1.1	Composition chimique	64
2.3.1.2	Paramètres influençant la composition et le rendement	71
2.3.1.2.1	Paramètres intrinsèques	73
2.3.1.2.2	Paramètres opératoires.....	74
2.3.2	<i>Pistacia lentiscus</i> L. (Pistachier)	74
2.3.2.1	Composition chimique	74
2.3.2.2	Paramètres influençant la composition et le rendement	74
2.3.2.2.1	Paramètres intrinsèques	74
2.3.2.2.1	Paramètres opératoires.....	100
2.3.3	<i>Mentha spicata</i> L. (Menthe verte)	101
2.3.3.1	Composition chimique	101
2.3.3.2	Paramètres influençant la composition et le rendement	101
2.3.3.2.1	Paramètres intrinsèques	108
2.3.4	<i>Pimpinella anisum</i> L. (Anis vert)	108
2.3.4.1	Composition chimique	108
2.3.4.2	Paramètres influençant la composition et le rendement	114
2.3.4.2.1	Paramètres intrinsèques	114
2.3.4.2.2	Paramètres opératoires.....	114
2.4	Cinétique d'extraction	116
2.4.1	<i>Rosmarinus officinalis</i> L. (Romarin)	116
2.4.1.1	Cinétique globale	116
2.4.1.2	Cinétique des constituants majoritaires	120
2.4.2	<i>Pistacia lentiscus</i> L. (Pistachier)	122
2.4.2.1	Cinétique globale	122
2.4.2.1.1	Influence du temps d'extraction sur le rendement	122
2.4.3	<i>Mentha spicata</i> L. (Menthe verte)	123
2.4.3.1	Cinétique globale	123
2.4.3.2	Cinétique des constituants majoritaires	124
2.4.4	<i>Pimpinella anisum</i> L. (Anis vert)	126
2.4.4.1	Cinétique globale	126
2.4.4.1.1	Influence du temps d'extraction sur le rendement	126
2.4.4.1.2	Influence de la masse de matière végétale.....	129
2.4.4.1.3	Influence de la puissance de chauffage	131

2.4.4.2	Cinétique des constituants	134
2.5	Conclusion	136
Chapitre 3	Modélisation	137
3.1	Introduction.....	138
3.2	Définitions.....	138
3.2.1	Modèle de 1 ^{er} ordre	138
3.2.2	Modèle de contribution des constituants	138
3.2.3	Planification factorielle des expériences	140
3.2.3.1	Plans factoriels 2 ^k	140
3.3	Application du modèle de 1er ordre sur les cinétiques d'extraction et calcul de la concentration en phase vapeur.....	141
3.3.1	<i>Rosmarinus officinalis</i> L. (Romarin)	142
3.3.1.1	Huile globale.....	142
3.3.1.2	Constituants majoritaires	145
3.3.2	<i>Pistacia lentiscus</i> L. (Pistachier)	161
3.3.2.1	Huile globale.....	161
3.3.3	<i>Mentha spicata</i> L. (Menthe verte)	162
3.3.3.1	Huile globale.....	162
3.3.3.2	Constituants majoritaires	163
3.3.4	<i>Pimpinella anisum</i> L. (Anis vert)	169
3.3.4.1	Huile globale.....	169
3.3.4.2	Constituants majoritaires	170
3.4	Etude par plans d'expériences.....	175
3.4.1	<i>Rosmarinus officinalis</i> L. (Romarin)	175
3.4.1.1	Plan factoriel 2 ² : Variation des effets sur la concentration au cours du temps	175
3.4.2	<i>Pimpinella anisum</i> L. (Anis vert)	179
3.4.2.1	Plan factoriel 2 ² : Variation des effets sur la concentration au cours du temps	179
3.5	Conclusion	182
Conclusion générale	183
Références bibliographiques	185

Liste des tableaux

Tableau 1: Avantages et inconvénients des méthodes d'extraction des huiles essentielles	38
Tableau 2: Propriétés physico-chimiques de l'HE de <i>Rosmarinus officinalis</i>	55
Tableau 3: Propriétés organoleptiques de l'HE du <i>Pistacia lentiscus</i>	58
Tableau 4: Paramètres physico-chimiques de l'HE du <i>Pistacia lentiscus</i>	58
Tableau 5: Propriétés organoleptiques de l'HE de <i>Mentha spicata</i>	61
Tableau 6: Propriétés physico-chimiques de l'HE de <i>Mentha spicata</i>	62
Tableau 7: Propriétés organoleptiques de l'HE de <i>Pimpinella anisum</i>	63
Tableau 8: Propriétés physico-chimiques de l'HE de <i>Pimpinella anisum</i>	64
Tableau 9: Composition chimique de l'huile essentielle de romarin de différentes régions d'Algérie...	65
Tableau 10: Composition chimique de l'huile essentielle de romarin de différents pays	68
Tableau 11: Composition chimique des différents chémotypes de l'huile essentielle de romarin	71
Tableau 12: Variation du rendement en HE de romarin en fonction de plusieurs paramètres	72
Tableau 13 : Composition chimique de l'huile essentielle de pistachier d'Algérie	75
Tableau 14 : Composition chimique de l'huile essentielle de pistachier d'Algérie (Suite)	82
Tableau 15: Composition chimique des huiles essentielles de pistachier de différents pays	89
Tableau 16: Influence de la nature et l'état du matériel végétal sur le rendement en huile essentielle de pistachier obtenue par hydrodistillation	99
Tableau 17: Influence de la durée d'extraction par hydrodistillation sur le rendement en huile essentielle des feuilles de pistachier	100
Tableau 18: Variation du rendement en HE de <i>Mentha spicata</i> extraite par hydrodistillation en fonction de plusieurs paramètres.....	101
Tableau 19: Composition chimique de l'huile essentielle de menthe verte de plusieurs régions d'Algérie	102
Tableau 20: Composition chimique de l'huile essentielle de menthe verte de différents pays.....	105
Tableau 21 : Composition chimique de l'huile essentielle d'anis d'Algérie	108
Tableau 22 : Composition chimique de l'huile essentielle d'anis de différents pays	109
Tableau 23: Composition chimique de l'huile essentielle d'anis de différents pays (suite)	110
Tableau 24: Influence de la nature et l'état du matériel végétal sur le rendement en huile essentielle de <i>Pimpinella anisum</i> obtenue par hydrodistillation	115
Tableau 25: Influence de la durée d'extraction par hydrodistillation sur le rendement en huile essentielle des graines de <i>Pimpinella anisum</i>	115
Tableau 26: Influence de la durée d'extraction par hydrodistillation sur le rendement en huile essentielle des fruits de <i>Pimpinella anisum</i>	115

Tableau 27: Influence du type de procédé sur la durée d'extraction et le rendement en huile essentielle des graines de <i>Pimpinella anisum</i>	116
Tableau 28: Cinétique d'extraction de l'HE de romarin par entrainement à la vapeur d'eau	117
Tableau 29: Cinétique d'extraction de l'HE de romarin par hydrodistillation	117
Tableau 30: Paramètres opératoires choisis pour le plan d'expériences.....	119
Tableau 31: Cinétique d'extraction des composés majoritaires de l'HE de romarin par entrainement à la vapeur d'eau.....	120
Tableau 32: Cinétique d'extraction des composés majoritaires de l'HE de romarin par hydrodistillation	120
Tableau 33: Cinétique d'extraction de l'HE de pistachier par hydrodistillation	122
Tableau 34: Cinétique d'extraction de l'HE de menthe verte du Nord et du Sud d'Algérie par hydrodistillation.....	124
Tableau 35: Cinétique d'extraction des composés majoritaires de l'HE de menthe verte par hydrodistillation.....	124
Tableau 36: Conditions opératoires de l'extraction de l'huile essentielle d'anis par hydrodistillation et MAHD.....	126
Tableau 37 : Cinétique d'extraction de l'HE d'anis par hydrodistillation assistée par micro-ondes (MAHD).....	127
Tableau 38 : Cinétique d'extraction de l'HE d'anis par hydrodistillation (HD)	127
Tableau 39 : Evolution du rendement en fonction de la masse de la matière végétale pour MAHD (A)	129
Tableau 40 : Evolution du rendement en fonction de la masse de la matière végétale pour HD (B) ..	129
Tableau 41 : Evolution du rendement en fonction de la puissance de chauffage pour MAHD (A)	131
Tableau 42 : Evolution du rendement en fonction de la puissance de chauffage pour HD (B).....	131
Tableau 43 : Cinétique d'extraction de l'HE d'anis	133
Tableau 44 : Cinétique d'extraction de l'HE d'anis et ces constituants majoritaires	134
Tableau 45: Paramètres du modèle de 1er ordre.....	142
Tableau 46: Paramètres du modèle de 1er ordre.....	143
Tableau 47: Paramètres du modèle de 1er ordre.....	148
Tableau 48: Paramètres du modèle GMCC.....	148
Tableau 49: Paramètres du modèle SMCC1	148
Tableau 50: Paramètres du modèle SMCC2	149
Tableau 51: Paramètres du modèle de 1er ordre.....	156
Tableau 52: Paramètres du modèle GMCC.....	156
Tableau 53: Paramètres du modèle SMCC1	156
Tableau 54: Paramètres du modèle SMCC2	157
Tableau 55 : Paramètres du modèle 1er ordre	161

Tableau 56: Paramètres du modèle de 1er ordre.....	162
Tableau 57: Paramètres du modèle de 1er ordre.....	165
Tableau 58: Paramètres du modèle GMCC.....	165
Tableau 59: Paramètres du modèle SMCC1	166
Tableau 60: Paramètres du modèle SMCC2	166
Tableau 61 : Paramètres du modèle 1er ordre	169
Tableau 62: Paramètres du modèle GMCC.....	172
Tableau 63: Paramètres du modèle SMCC1	172
Tableau 64: Domaine d'étude	175
Tableau 65: Coordonnées réelles et centrées réduites du plan factoriel 2 ²	176
Tableau 66 : Evolution de la concentration de l'huile essentielle en phase vapeur obtenue pour les essais programmés en fonction du temps	177
Tableau 67: Variation des effets des paramètres opératoires sur la concentration en fonction du temps	177
Tableau 68 : Domaine d'étude.....	179
Tableau 69 : Coordonnées réelles et centrées réduites du plan factoriel 2 ²	179
Tableau 70 : Concentration de l'huile essentielle en phase vapeur obtenue pour les essais programmés par le plan factoriel 2 ² à chaque instant.....	179
Tableau 71 : Evolution des effets des paramètres opératoires sur la concentration en fonction du temps	180

Liste des figures

Figure 1: Schéma descriptif de l'entraînement à la vapeur d'eau	24
Figure 2: Schéma descriptif de l'hydro-distillation	24
Figure 3: Schéma descriptif de l'extraction par pression à froid	25
Figure 4: Schéma descriptif de l'Hydro-diffusion	26
Figure 5: Schéma de préparation de l'extrait de rose en Herzégovine.....	26
Figure 6: Transferts thermiques sous chauffage conventionnel et micro-onde	28
Figure 7: Schéma de l'hydrodistillation assistée par micro-ondes (MAHD).....	29
Figure 8: Schéma de l'extraction par solvant assistée par micro-ondes (SME)	30
Figure 9: Schéma de l'extraction sans solvant assistée par micro-ondes (SFME)	31
Figure 10: Schéma de l'hydro-distillation assistée par micro-ondes sous pression réduite (VMHD) ...	31
Figure 11: Schéma de l'hydro-diffusion assistée par micro-ondes et gravité (MHG)	32
Figure 12: Schéma de l'entraînement à la vapeur assisté par microondes (MSD)	33
Figure 13: Schéma de l'entraînement à l'air assisté par micro-ondes (CAMD).....	34
Figure 14: Schéma de la hydro-diffusion assistée par microondes (MSDf).....	35
Figure 15: Schéma de l'extraction par CO2 supercritique	36
Figure 16: Schéma de l'extraction assistée par ultrasons (UAE)	37
Figure 17: Schéma de l'extraction par chauffage ohmique.....	38
Figure 18: Une unité d'isoprène.....	40
Figure 19: Exemples de structures de monoterpènes	41
Figure 20: Exemples de structures de sesquiterpènes	41
Figure 21: Structure du linalol et du menthol (de gauche à droite)	42
Figure 22: Structure du carotol, viridiflorol, cédrol (de gauche à droite)	43
Figure 23: Structure du sclaréol.....	43
Figure 24: Structure du phénol	44
Figure 25: Principaux phénols présents dans les huiles essentielles	44
Figure 26: Phénol méthyl-éther	45
Figure 27: Structure du chavicol méthyl-éther (estragole).....	45
Figure 28: Structures de quelques éthers oxydes présents dans les huiles essentielles.....	45
Figure 29: Structure du 1,8-cinéole	46
Figure 30: Structure de quelques aldéhydes présents dans les HE	46
Figure 31: Structure de l'acétate de lavandulyle	47
Figure 32: Structure du bornéone (camphre).....	47
Figure 33: Structure de l'ombelliférone.....	48
Figure 34: <i>Rosmarinus Officinalis</i> L. (le romarin)	54

Figure 35: Coupe transversale de la feuille de <i>Rosmarinus officinalis</i> L. Poils épidermiques	54
Figure 36: Poil sécréteur chez le <i>Rosmarinus officinalis</i> L.	55
Figure 37 : <i>Pistacia lentiscus</i> L. (le pistachier)	57
Figure 38: Coupe transversale de la nervure principale de la feuille de <i>Pistacia lentiscus</i>	57
Figure 39: Coupe transversale de la feuille de <i>Pistacia lentiscus</i> montrant les conduits sécréteurs.....	57
Figure 40: Coupe transversale de la tige de <i>Pistacia lentiscus</i>	58
Figure 41: <i>Mentha spicata</i> L. (la menthe verte)	60
Figure 42: a) Coupe transversale de la feuille de <i>M.spicata</i> observée au microscope optique x 400 montrant des poils tecteurs (Pt) et des trichomes capités (Tc). b) Micrographie de la feuille de <i>M.spicata</i> montrant des poils tecteurs (Pt), et des trichomes capités (Tc) au MEB x 250	61
Figure 43: <i>Pimpinella anisum</i> L. (l'anis vert)	63
Figure 44 : Evolution du rendement en HE de romarin au cours de l'entraînement à la vapeur d'eau et l'hydrodistillation.....	118
Figure 45: Cinétique d'extraction de l'HE de Romarin sous différentes conditions opératoires.....	119
Figure 46: Cinétique d'extraction des constituants majoritaires de l'HE de romarin par entraînement à la vapeur d'eau	121
Figure 47: Cinétique d'extraction des constituants majoritaires de l'HE de romarin par hydrodistillation	121
Figure 48 : Evolution du rendement en HE de pistachier en fonction de la durée d'extraction	123
Figure 49: Evolution du rendement en HE de menthe verte du Nord et du Sud Algérien en fonction de la durée d'extraction	124
Figure 50: Evolution du rendement en carvone au cours de l'hydrodistillation de <i>Mentha spicata</i>	125
Figure 51: Evolution du rendement en (Z)-carvéol au cours de l'hydrodistillation de <i>Mentha spicata</i>	125
Figure 52: Evolution du rendement en 1,8-cinéole au cours de l'hydrodistillation de <i>Mentha spicata</i>	125
Figure 53: Evolution du rendement en germagrène D au cours de l'hydrodistillation de <i>Mentha spicata</i>	126
Figure 54 : Evolution du rendement en HE de <i>Pimpinella anisum</i> en fonction de la durée d'extraction (cas de l'extraction par hydrodistillation assistée par micro-ondes (MAHD)	127
Figure 55: Evolution du rendement en HE de <i>Pimpinella anisum</i> en fonction de la durée d'extraction (cas de l'extraction par hydrodistillation).....	128
Figure 56: Evolution du rendement de l'HE de <i>Pimpinella anisum</i> en fonction de la masse de matière végétale pour les procédés (A) MAHD et (B) HD	130
Figure 57: Evolution du rendement de l'HE de <i>Pimpinella anisum</i> en fonction de la puissance de chauffage pour les procédés (A) MAHD et (B) HD	132
Figure 58: Evolution du rendement en HE de <i>Pimpinella anisum</i> en fonction de la durée d'extraction	133

Figure 59: Evolution du rendement en estragol en fonction de temps	134
Figure 60: Evolution du rendement en anéthol en fonction du temps	135
Figure 61: Evolution du rendement en O-isoeugénol en fonction du temps	135
Figure 62: Evolution du rendement en γ -himachalène en fonction du temps	136
Figure 63: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de romarin par entrainement à la vapeur d'eau et hydrodistillation	142
Figure 64: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction de romarin par entrainement à la vapeur d'eau	143
Figure 65: Evolution de la concentration en phase vapeur de l'huile essentielle de romarin en fonction du temps lors de l'entrainement à la vapeur d'eau et l'hydrodistillation.....	144
Figure 66: Evolution de la concentration en phase vapeur de l'huile essentielle de romarin en fonction du temps lors de l'entrainement à la vapeur d'eau.....	144
Figure 67: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du 1,8-cinéole dans l'huile essentielle de romarin par entrainement à la vapeur d'eau.....	145
Figure 68: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du camphre dans l'huile essentielle de romarin par entrainement à la vapeur d'eau.....	145
Figure 69: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du bornéol dans l'huile essentielle de romarin par entrainement à la vapeur d'eau.....	146
Figure 70: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du α -terpinéol dans l'huile essentielle de romarin par entrainement à la vapeur d'eau.....	146
Figure 71: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du β -caryophyllène dans l'huile essentielle de romarin par entrainement à la vapeur d'eau.....	147
Figure 72: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du δ -cadinène dans l'huile essentielle de romarin par entrainement à la vapeur d'eau.....	147
Figure 73: Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de romarin par entrainement à la vapeur d'eau par les modèles GMCC, SMCC1 et SMCC2	149
Figure 74: Evolution de la concentration en phase vapeur du 1,8-cinéole dans l'huile essentielle de romarin au cours du temps lors de l'entrainement à la vapeur d'eau.....	150
Figure 75: Evolution de la concentration en phase vapeur du camphre dans l'huile essentielle de romarin au cours du temps lors de l'entrainement à la vapeur d'eau.....	150
Figure 76: Evolution de la concentration en phase vapeur du bornéol dans l'huile essentielle de romarin au cours du temps lors de l'entrainement à la vapeur d'eau.....	151
Figure 77: Evolution de la concentration en phase vapeur du α -terpinéol dans l'huile essentielle de romarin au cours du temps lors de l'entrainement à la vapeur d'eau.....	151
Figure 78: Evolution de la concentration en phase vapeur du β -caryophyllène dans l'huile essentielle de romarin au cours du temps lors de l'entrainement à la vapeur d'eau	152
Figure 79: Evolution de la concentration en phase vapeur du δ -cadinène dans l'huile essentielle de	

romarin au cours du temps lors de l'entraînement à la vapeur d'eau	152
Figure 80: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du 1,8-cinéole dans l'huile essentielle de romarin par hydrodistillation	153
Figure 81: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du camphre dans l'huile essentielle de romarin par hydrodistillation	153
Figure 82: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du bornéol dans l'huile essentielle de romarin par hydrodistillation	154
Figure 83: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du α -terpinéol dans l'huile essentielle de romarin par hydrodistillation	154
Figure 84: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du bornyl acétate dans l'huile essentielle de romarin par hydrodistillation	155
Figure 85: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du β -caryophyllène dans l'huile essentielle de romarin par hydrodistillation	155
Figure 86: Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de romarin par hydrodistillation par les modèles GMCC, SMCC1 et SMCC2	157
Figure 87: Evolution de la concentration en phase vapeur du 1,8-cinéole dans l'huile essentielle de romarin au cours du temps lors de l'hydrodistillation	158
Figure 88: Evolution de la concentration en phase vapeur du camphre dans l'huile essentielle de romarin au cours du temps lors de l'hydrodistillation	158
Figure 89: Evolution de la concentration en phase vapeur du bornéol dans l'huile essentielle de romarin au cours du temps lors de l'hydrodistillation	159
Figure 90: Evolution de la concentration en phase vapeur du α -terpinéol dans l'huile essentielle de romarin au cours du temps lors de l'hydrodistillation	159
Figure 91: Evolution de la concentration en phase vapeur du bornyl acétate dans l'huile essentielle de romarin au cours du temps lors de l'hydrodistillation	160
Figure 92: Evolution de la concentration en phase vapeur du β -caryophyllène dans l'huile essentielle de romarin au cours du temps lors de l'hydrodistillation	160
Figure 93 : Application du modèle de 1 ^{er} ordre à la cinétique d'extraction du pistachier par hydrodistillation	161
Figure 94 : Simulation de la concentration de l'huile essentielle de pistachier par le modèle de 1 ^{er} ordre.	162
Figure 95: Application du modèle de 1 ^{er} ordre à la cinétique d'extraction de <i>Mentha spicata</i> du nord et du sud d'Algérie au cours de l'hydrodistillation	163
Figure 96: Evolution de la concentration en phase vapeur de l'huile essentielle de menthe verte au cours de l'hydrodistillation	163
Figure 97: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du carvone dans l'huile essentielle de menthe verte par hydrodistillation	164

Figure 98: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du 1,8-cinéole dans l'huile essentielle de menthe verte par hydrodistillation	164
Figure 99: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du (Z)-carvéol dans l'huile essentielle de menthe verte par hydrodistillation	164
Figure 100: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du Germacrène D dans l'huile essentielle de menthe verte par hydrodistillation	165
Figure 101: Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de menthe verte par hydrodistillation par les modèles GMCC, SMCC1 et SMCC2	166
Figure 102: Evolution de la concentration en phase vapeur du carvone au cours de l'hydrodistillation de <i>Mentha spicata</i>	167
Figure 103: Evolution de la concentration en phase vapeur du 1,8-Cinéole au cours de l'hydrodistillation de <i>Mentha spicata</i>	167
Figure 104: Evolution de la concentration en phase vapeur du (Z)-Carveol au cours de l'hydrodistillation de <i>Mentha spicata</i>	168
Figure 105: Evolution de la concentration en phase vapeur du germacrène D au cours de l'hydrodistillation de <i>Mentha spicata</i>	168
Figure 106 : Application du modèle de 1 ^{er} ordre à la cinétique d'extraction de l'huile essentielle d'anis par hydrodistillation	169
Figure 107 : Simulation de la concentration de l'huile essentielle d'anis par le modèle de 1 ^{er} ordre	170
Figure 108 : Simulation de la cinétique d'extraction de l'estragol par le modèle du 1 ^{er} ordre.....	170
Figure 109 : Simulation de la cinétique d'extraction de l'anéthol par le modèle du 1 ^{er} ordre.....	171
Figure 110 : Simulation de la cinétique d'extraction de l'o-isoougénol par le modèle du 1 ^{er} ordre..	171
Figure 111 : Simulation de la cinétique d'extraction du γ -himachalène par le modèle du 1 ^{er} ordre....	172
Figure 112 : Simulation du rendement en huile essentielle d'anis lors de l'extraction par hydrodistillation par les modèles GMCC et SMCC	173
Figure 113 : Simulation de la concentration de l'estragol par le modèle de 1 ^{er} ordre.....	173
Figure 114 : Simulation de la concentration de l'anéthol par le modèle de 1 ^{er} ordre.....	174
Figure 115 : Simulation de la concentration de l'o-isoougénol par le modèle de 1 ^{er} ordre.	174
Figure 116 : Simulation de la concentration du γ -himachalène par le modèle de 1 ^{er} ordre.....	175
Figure 117 : Evolution de la concentration en phase vapeur de l'huile essentielle de romarin en fonction du temps sous différentes conditions opératoires	176
Figure 118: Variation des effets des paramètres opératoires et des effets conjugués sur la concentration en fonction du temps	177
Figure 119 : Evolution de la concentration en fonction du temps pour chaque expérience.	180
Figure 120 : Variation des effets individuels et conjugués sur la concentration en huile essentielle en fonction du temps.	181

Liste des abréviations

AFNOR : Association Française de Normalisation

CAMD : Entraînement à l'air assisté par micro-ondes (Compressed Air Microwave Distillation)

C_f : Concentration en phase fluide (mg/g)

CG-SM : Chromatographie Gazeuse couplée à la Spectrométrie de Masse

CPG : Chromatographie en Phase Gazeuse

GMCC : Modèle global de contribution des composants (Global Model of Components Contribution)

H : Taux d'humidité de la matière végétale (%)

HE : Huile Essentielle

HD : Hydro-Distillation

I_A : Indice d'acide

I_E : Indice d'ester

ISO : Organisation internationale de normalisation (International Organisation for Standardization)

MAE : Extraction assistée par micro-ondes (Microwave Assisted Extraction)

MAHD : Hydrodistillation assistée par micro-ondes (Microwave Assisted Hydro-Distillation)

MAP : Procédé assisté par micro-ondes (Microwave Assisted Process)

$M_{HE(t)}$: Masse de l'huile essentielle extraite à chaque instant (g)

$M_{HE(s)}$: Masse de l'huile essentielle restante dans le végétal (g)

MHG : Hydro-diffusion assistée par micro-ondes et gravité (Microwave Hydro-diffusion and Gravity)

MSD : Entraînement à la vapeur d'eau assisté par micro-ondes (Microwave Steam Distillation)

MSDf : Hydro-diffusion assistée par micro-ondes (Microwave Steam Diffusion)

M_v : Masse du végétal (g)

PLE : Extractions par liquide pressurisé (Pressurized Liquid Extraction)

Q : Débit de vapeur ascendant (g/min)

Q_v : Débit volumique de vapeur (ml/min)

R^2 : Coefficient de corrélation

R_{HE} : Rendement en huile essentielle (%)

SD : Entrainement à la vapeur d'eau (Steam Distillation)

SFE : Extractions par fluide super critique (Supercritical Fluid Extraction)

SFME : Extractions sans solvant assistée par micro-ondes (Solvent Free Microwave Extraction)

SMCC : Modèle simplifié de contribution des composants (Simplified Model of Components Contribution)

SME : Extraction par solvant assistée par micro-ondes (Solvent Microwave Extraction)

UAE : Extractions assistée par ultrasons (Ultra-sound Assisted Extraction)

VMHD : Hydrodistillation sous pression réduite assistée par micro-ondes (Vacuum Microwave Hydro-Distillation)

WHO : Organisation mondiale de la santé (World Health Organisation)

X_i : Variable réduite

Y_i : Réponse des expériences effectuées par plan d'expériences

$Y(t)$: Rendement en l'huile essentielle en fonction du temps (%g/g de matière végétale)

Y_{∞} : Rendement maximal en huile essentielle à la fin de l'extraction (%g/g de matière végétale)

$Y_{\infty i}$: Rendement maximal du composé (i) à la fin de l'extraction (%g/g de matière végétale)

a_i, a_{ij}, a_{ijk} : Coefficients du polynôme

d_{20}^{20} : Densité relative à 20°C

f : Fraction de l'huile essentielle contenue dans les cellules brisées

g_i : Teneur du composé (i) dans l'huile essentielle

i : Indice du composé de l'huile essentielle

k : Constante de temps (min^{-1}).

k_i : Constante de temps du composé (i) (min^{-1})

k_{MC1} et k_{MC2} : Constantes de temps des deux composés majoritaires (min^{-1})

k_{OC} : Constante de temps du reste des composés (min^{-1})

m : Masse initiale de l'huile essentielle dans le solide (g)

m_0 : Masse de l'huile essentielle résiduelle dans le solide (g)

n : Nombre total de composés de l'huile essentielle

n_{20} : Indice de réfraction à 20°C

t : Temps d'extraction (min)

Introduction générale

Avant le développement de la médecine moderne, l'homme a toujours utilisé les produits issus de la nature pour se soigner. Les plantes par exemple, étaient reconnues depuis l'antiquité pour leurs vertus thérapeutiques, et leur connaissance s'est transmise de génération en génération. Plusieurs méthodes artisanales étaient utilisées dès lors pour l'extraction des substances actives à partir de ces plantes. Ces substances sont connues sous le nom des « Huiles essentielles » (Goeb, 1999).

Malgré le développement de la médecine moderne, les remèdes naturels de bonne réputation restent toujours utilisés à ce jour. De plus, la découverte progressive des applications des huiles essentielles dans d'autres domaines d'intérêt économique comme les cosmétiques ou l'alimentation a créé une demande de plus en plus forte sur les marchés mondiaux (Tchamdja, 1995).

L'Algérie est un pays qui recèle un potentiel important et diversifié de plantes aromatiques et médicinales grâce à sa flore particulièrement riche en plantes utiles telles que le romarin, l'ortie, le thym, la menthe, le pistachier, l'anis, la morelle noire, la bourrache, ...etc. Cette diversité est liée principalement à la nature de son climat et à la richesse de ses sols. De plus, certaines de ces plantes sont utilisées dans la préparation de beaucoup de remèdes traditionnels.

L'extraction et l'utilisation des huiles essentielles doit être basée sur les connaissances fiables et suffisantes apportées par des recherches scientifiques bien menées. C'est pour cela que beaucoup de chercheurs se sont intéressés à l'extraction, l'analyse, l'utilisation des huiles essentielles ainsi que l'optimisation de leurs procédés d'extraction.

Dans le cadre de la valorisation des essences d'espèces végétales algériennes, et compte tenu de leurs vertues thérapeutiques et de leurs diverses applications dans l'industrie, nous nous sommes intéressés à l'étude des paramètres influençant le rendement, la composition, la cinétique et enfin la concentration de l'huile essentielle lors de l'extraction à la vapeur d'eau. Cette étude sera axée sur quatre espèces aromatiques : *Rosemarinus officinalis* L., *Pistacia lentiscus* L., *Mentha spicata* L. et *Pimpinella anisum* L.

Notre choix s'est porté sur ces espèces, car elles sont très répandues en Algérie et ont fait l'objet de beaucoup de recherches antérieures. Cependant, peu de travaux se sont intéressés à la qualité de l'huile essentielle extraite. Cette étude nous permet alors de suivre à la fois la qualité et la quantité de l'huile essentielle par le biais de l'étude de sa concentration.

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à la présentation de notions générales concernant les huiles essentielles : définition, procédés d'extraction, composition chimique, caractérisation et méthodes d'analyse.

Dans le second chapitre nous présentons, d'une manière assez détaillée, les quatre substrats végétaux étudiés, puis nous citons les principaux travaux antérieurs relatifs à ces plantes tout en discutant et en comparant leurs résultats et faire des commentaires.

Le dernier chapitre a été dédié à la modélisation des différentes cinétiques recueillies et de la concentration au cours de l'extraction. Pour aboutir enfin à une étude par plans d'expériences afin de déterminer l'effet des paramètres opératoires sur la concentration.

Chapitre 1

Généralités sur les huiles essentielles

1.1 Définition

Les huiles essentielles selon la norme ISO 9235 de l'AFNOR (l'Association Française de Normalisation), sont : « *des produits obtenus soit à partir de matières premières naturelles par distillation à l'eau ou à la vapeur d'eau, soit à partir des fruits de Citrus par des procédés mécaniques et qui sont séparés de la phase aqueuse par des procédés physiques* ». (AFNOR, 1998) et selon la pharmacopée française 1985 : *les huiles essentielles sont des produits de compositions généralement assez complexe, renfermant les principes volatils contenus dans les végétaux et plus ou moins modifiés aux cours de la préparation* (Combaz, 1985).

Elles peuvent être extraites de différentes parties de la plante telle que :

- Les fleurs (la rose, le jasmin, l'œillet, le clou de girofle, le mimosa, le romarin, la lavande, la fleur d'oranger),
- Les feuilles (la menthe, la citronnelle),
- Les feuilles et tiges (le géranium, la verveine, la cannelle),
- L'écorce (la cannelle, le cassia), le bois (le cèdre, le pin),
- Les racines (l'angélique, le vétiver, la valériane),
- Les graines (le fenouil, la coriandre, le cumin, la noix de muscade),
- Les fruits (la bergamote, l'orange, le citron), les rhizomes (le gingembre, le curcuma) (Sukhdev Swami et al., 2008).

1.2 Méthodes d'extraction

Différentes méthodes d'extraction des huiles essentielles sont mises en œuvre. Ces méthodes peuvent être classées selon deux catégories : les méthodes conventionnelles et les méthodes innovantes :

1.2.1 Méthodes conventionnelles

1.2.1.1 Distillation par entraînement à la vapeur

C'est le passage d'un courant de vapeur d'eau à travers une cuve contenant des plantes. Les huiles essentielles volatiles sont libérées sous l'influence de l'humidité et de la chaleur. Ensuite, à travers un serpentin refroidi à l'eau, passent la vapeur d'eau et l'huile essentielle, où cette vapeur y est condensée en un liquide qui est un mélange d'eau et d'huile essentielle, ce mélange est séparé ensuite dans un essencier. L'huile essentielle n'est pas miscible à l'eau, elle est plus légère et donc elle se trouve au sommet de l'essencier.

L'avantage de cette technique est qu'elle réduit la température de distillation. Par conséquent, les composés sont entraînés à une température bien inférieure à leur point d'ébullition, ce qui empêche leur décomposition (De Silva, 1995). La figure 1 montre le schéma descriptif de l'entraînement à la vapeur d'eau.

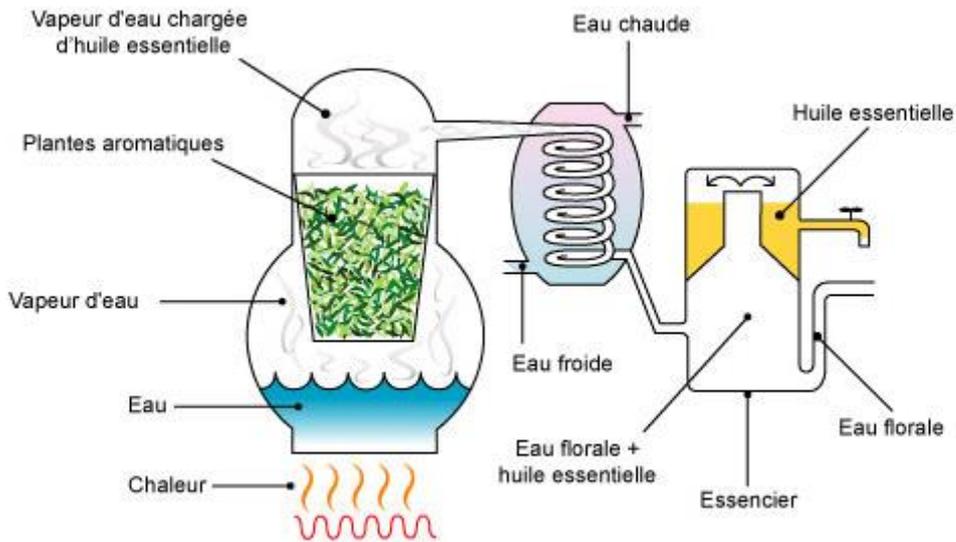


Figure 1: Schéma descriptif de l'entraînement à la vapeur d'eau (De Silva, 1995)

1.2.1.2 Hydrodistillation

C'est une méthode très répandue d'extraction des huiles essentielles qui repose sur un principe simple d'immersion d'une partie de la plante à extraire dans l'eau chauffée jusqu'à l'ébullition généralement à pression atmosphérique. L'huile essentielle est évaporée avec de la vapeur d'eau. Les vapeurs sont alors condensées avec un réfrigérant. Ensuite, le distillat est récupéré dans un Erlenmeyer (De Silva, 1995). En raison de la différence de densité entre l'eau et les molécules aromatiques, ces dernières se séparent en une phase aqueuse et une phase organique : L'huile essentielle (Figure 2).

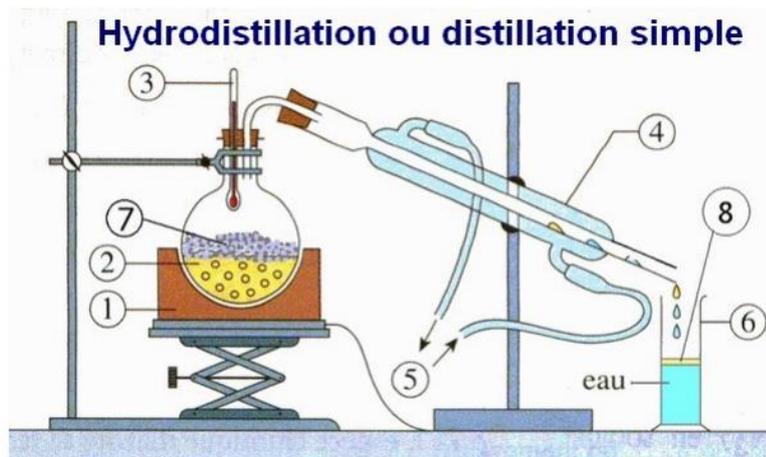


Figure 1 : L'hydrodistillation
1: Chauffe-ballon 2:Eau bouillante 3:Thermomètre 4:Réfrigérant à eau 5:Arrivée d'eau froide et Sortie d'eau tiède
6:Essencier 7:Végétal 8:Huile Essentielle

Figure 2: Schéma descriptif de l'hydro-distillation (De Silva, 1995)

1.2.1.3 Expression à froid

Ce procédé mécanique est beaucoup plus simple que la distillation, réalisée sans chauffage pour récupérer l'huile essentielle présente dans la peau (ou épicarpe) des agrumes et spécialement conçue pour les agrumes en raison de l'emplacement de leurs huiles essentielles (De Silva, 1995). Basé sur la décomposition de la rupture des péricarpes, riche en huiles essentielles. L'huile essentielle ainsi libérée est évacuée par un courant d'eau. Formation d'une émulsion constituée d'eau et d'essence, qui est ensuite centrifugée pour séparer l'huile essentielle présente dans la peau (ou épicarpe) des agrumes (Figure 3).

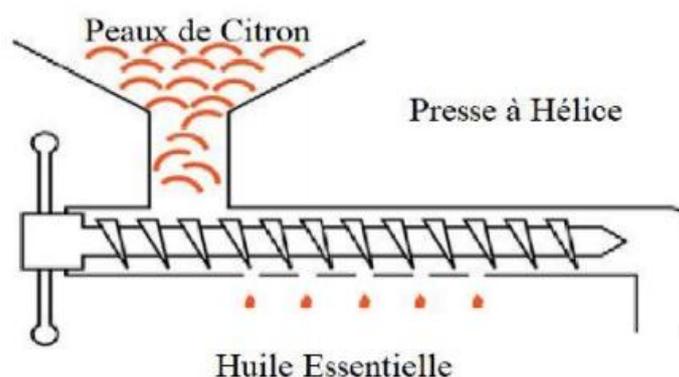


Figure 3: Schéma descriptif de l'extraction par pression à froid (De Silva, 1995)

1.2.1.4 Vapo-diffusion (hydro-diffusion)

La vapeur d'eau est introduite de haut en bas à travers la plante aromatique (Figure 4). Cette méthode utilise la gravité pour libérer et condenser le mélange «vapeur d'eau - huile essentielle» dispersé dans la matière végétale. La composition des produits obtenus est qualitativement sensiblement différente à celle des produits obtenus par les autres méthodes classiques (De Silva, 1995).

Les avantages de cette méthode sont : un meilleur rendement en huile, plus rapide donc moins nocive pour les composés volatils, un temps de traitement plus court ce qui permet d'économiser l'énergie et donc de consommer moins de vapeur.

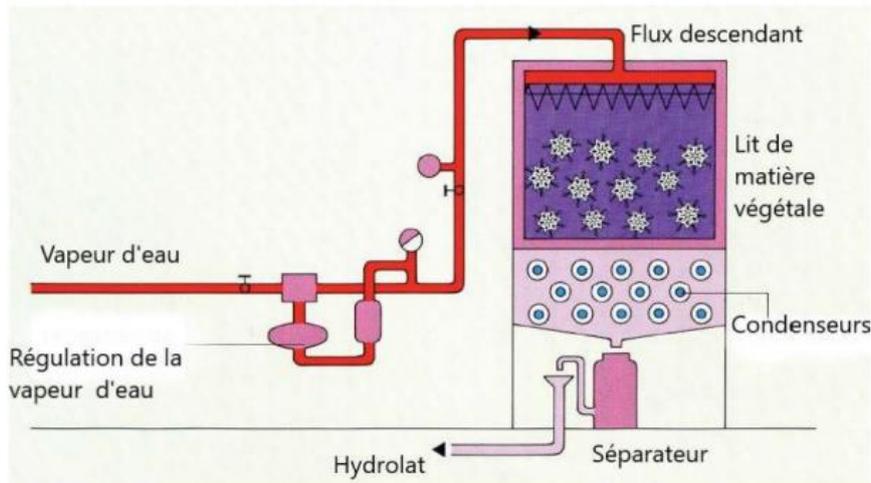


Figure 4: Schéma descriptif de l'Hydro-diffusion
(De Silva, 1995)

1.2.1.5 Distillation « sèche »

La distillation sèche, ou distillation destructive, est un type de pyrolyse. Cela se fait généralement avec du bois, du charbon ou des roches de schiste, tout ce qui est solide à haute teneur en matière organique. Dans le domaine de l'extraction végétal, les plantes ou des parties de plantes sont chauffées très légèrement à une température inférieure à 100°C sans ajout d'eau ni de solvant organique, ce qui empêche la dénaturation (c'est la perte de la conformation tridimensionnelle normale de la macromolécule biologique) de certaines particules thermosensibles. Cette technique présente un avantage certain au niveau de la qualité mais elle aboutit à des rendements extrêmement faibles en huile essentielle. C'est donc une méthode adaptée pour les matières premières particulièrement fragiles (De Silva, 1995). La Figure 5 montre l'équipement de la distillation sèche, utilisée pour isoler l'huile essentielle de rose par distillation sèche.

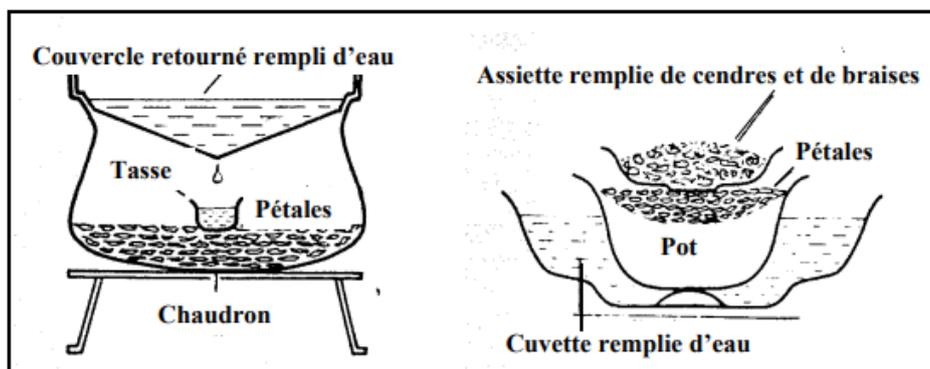


Figure 5: Schéma de préparation de l'extrait de rose en Herzégovine
(De Silva, 1995)

1.2.2 Méthodes innovantes

Un des inconvénients des techniques conventionnelles d'extraction est lié à la thermosensibilité des composants des huiles essentielles qui subissent des altérations chimiques (hydrolyse, isomérisation, oxydation) sous l'effet des hautes températures appliquées. La qualité des huiles essentielles extraites est donc extrêmement affectée, surtout si la durée d'extraction est longue. Une bonne méthode d'extraction est celle qui doit maintenir la composition chimique et les proportions naturelles des huiles essentielles dans leur état d'origine. Depuis que la rentabilité, le respect de l'environnement, la durabilité, la haute efficacité et la bonne qualité régissent la production industrielle moderne, les techniques d'extraction des huiles essentielles n'ont jamais cessé d'évoluer. De nouvelles techniques continuent d'apparaître ces dernières années pour obtenir des extraits naturels d'une qualité similaire ou supérieure à celle des méthodes classiques. Les nouvelles techniques d'extraction doivent également réduire le temps d'extraction, la consommation d'énergie, l'utilisation de solvants et les émissions de CO₂ (Rassem et al., 2016).

1.2.2.1 Extraction assistée par micro-ondes

Par définition, les micro-ondes aussi appelées hyperfréquences sont des ondes électromagnétiques occupant une bande de fréquence de trois décades à partir de 300 GHz jusqu'à 300 MHz. La fréquence généralement utilisée est de 2450 MHz, ce qui correspond à une longueur d'onde de 12,2 cm.

Le principe du chauffage micro-ondes repose sur le fait que les molécules polaires, telles que celle de l'eau, ont des pôles négatifs et positifs : ce sont des dipôles. En l'absence de champ électrique, les dipôles sont orientés aléatoirement. Dans l'autre cas, sous l'effet d'un champ électrique continu, les molécules s'orientent en suivant la direction du champ appliqué. Sous l'effet d'un champ électrique alternatif de fréquence f , les dipôles suivent la direction du champ sur une demi-alternance, se désorientent lorsque le champ s'annule et se réorientent dans l'autre sens pendant la seconde demi alternance. On appelle ceci une rotation dipolaire. L'énergie électrique est transformée en énergie cinétique par cette rotation. L'énergie cinétique est ensuite convertie partiellement en chaleur (Chemat et Lucchesi, 2005).

Le transfert de chaleur avec chauffage micro-ondes est totalement inversé par rapport au chauffage conventionnel. Alors que le transfert de chaleur classique se transmet de l'extérieur vers l'intérieur du récipient, sous chauffage micro-ondes, l'objet traité devient lui-même source de chaleur : on dit que le dégagement de la chaleur se fait de l'intérieur vers l'extérieur. C'est un mode de chauffage immédiat en volume et non en surface. Les phénomènes de conduction et de convection ne jouent plus qu'un rôle secondaire d'équilibrage de la température. La Figure 6 montre la différence entre ces deux modes de chauffage (Chemat et Lucchesi, 2005).

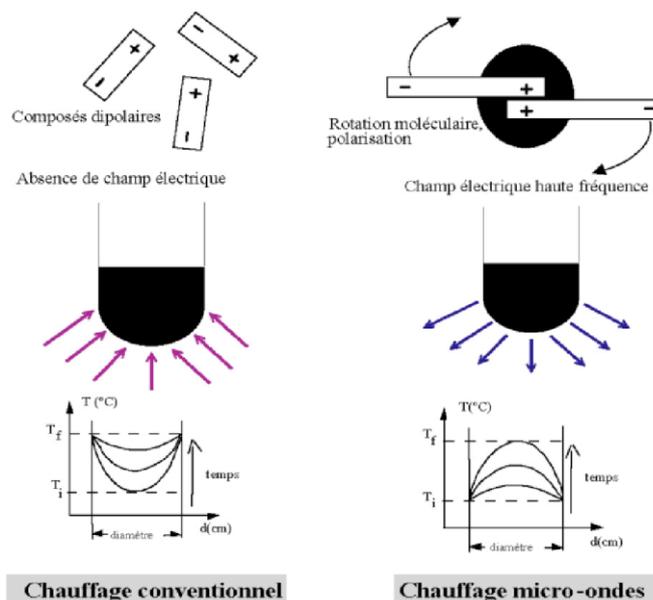


Figure 6: Transferts thermiques sous chauffage conventionnel et micro-onde
(Chemat et Lucchesi, 2005)

1.2.2.1.1 L'hydrodistillation assistée par micro-ondes (MAHD)

Stashenko et coll. (Stashenko et al., 2004) ont développé un procédé d'extraction basé sur l'hydrodistillation classique qui est l'hydrodistillation assistée par micro-ondes (Microwave Assisted Hydrodistillation). Ce procédé consiste à placer une partie du montage dans le four à micro-ondes (Figure 7). La matière végétale est chauffée en présence d'une quantité d'eau suffisante dans un ballon disposé dans l'enceinte du four à micro-ondes. Le système de refroidissement ainsi que la partie consacrée à la récupération de l'huile essentielle sont situés à l'extérieur du four (Chemat et Lucchesi, 2005). Cette méthode a été appliquée pour l'extraction des huiles essentielles de plusieurs plantes aromatiques et épices (Farhat, 2010).

Cette méthode garantit une extraction rapide avec la moindre consommation de solvant, un chauffage sécurisé et contrôlé (Rassem et al., 2016), la similitude de la composition de l'huile par rapport à une hydrodistillation classique et une facture énergétique et environnementale réduite (Farhat, 2010).

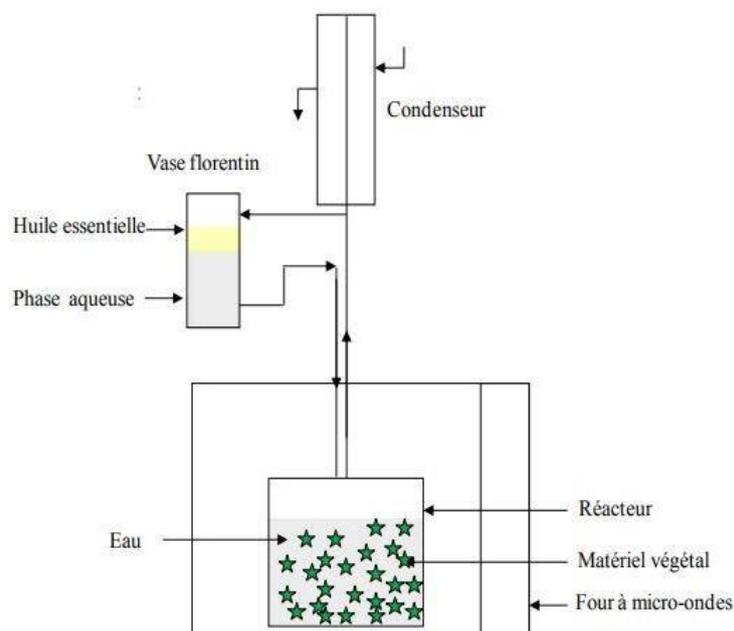


Figure 7: Schéma de l'hydrodistillation assistée par micro-ondes (MAHD)
(Farhat, 2010)

1.2.2.1.2 L'extraction par solvant assistée par micro-ondes (SME)

En 1986, en Hongrie, Ganzler et coll. (Ganzler et al., 1986) furent les tout premiers à proposer une technique d'extraction par solvant assistée par micro-ondes. Ce procédé consistait à irradier de la matière végétale ou non par micro-ondes, broyée au préalable en présence d'un solvant absorbant fortement les micro-ondes (le méthanol) pour l'extraction de composés polaires ou bien en présence d'un solvant n'absorbant pas les micro-ondes (hexane) pour l'extraction de composés apolaires. Les travaux ont continué d'avancer, et c'est en 1990 que l'équipe canadienne de Paré et coll. (Paré et al., 1990) a déposé un premier brevet européen, sur « l'extraction de produits naturels assistée par micro-ondes ». Le procédé original sera par la suite quelque peu modifié et enrichi et sera dénommé : MAPTM (Microwave Assisted Process). Actuellement la MAE (Microwave Assisted Extraction) est plus généralement citée dans les travaux publiés. Un montage à échelle pilote d'extraction des épices et aromates par la technique MAPTM est présenté dans la Figure 8. Cette technique est applicable sur un grand nombre de matrices solides ou liquides telles que les végétaux mais aussi les tissus animaux, les sols, les cosmétiques ou les eaux polluées (Chemat et Lucchesi, 2005).

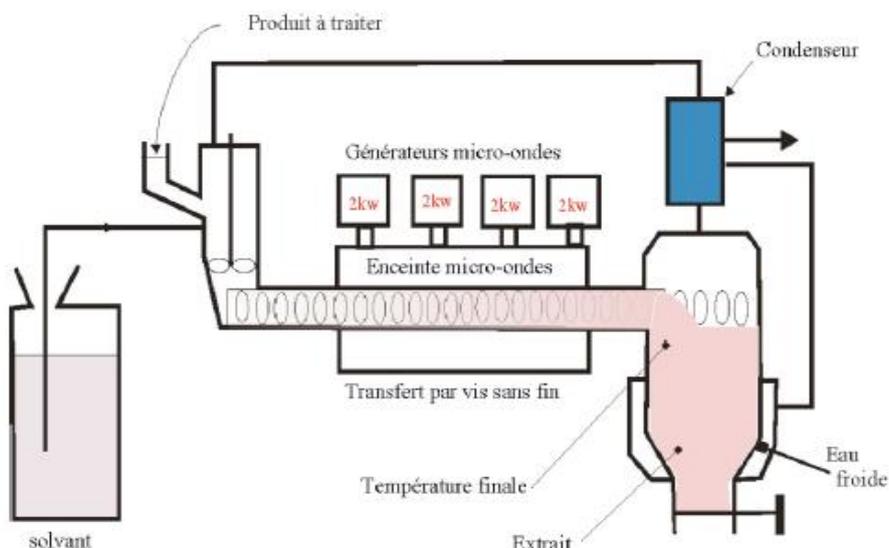


Figure 8: Schéma de l'extraction par solvant assistée par micro-ondes (SME)
(Chemat et Lucchesi, 2005)

1.2.2.1.3 L'extraction sans solvant assistée par micro-ondes (SFME)

Une nouvelle méthode d'extraction des produits naturels assistée par micro-ondes sans solvant et sans eau à pression atmosphérique a été développée et brevetée en 2004 par Chemat et coll. (Chemat et al., 2004). Cette méthode est basée sur le principe de la distillation sèche assistée par microondes qui consiste à placer le matériel végétal dans un four à microondes sans ajouter ni eau ni solvant organique. Le chauffage de l'eau interne à la plante permet la rupture des glandes contenant l'huile essentielle. Cette étape libère l'huile essentielle qui est ensuite entraînée par la vapeur d'eau produite à partir de l'eau présente dans la matière végétale. Un système de refroidissement à l'extérieur du four permet la récupération du distillat, composé d'eau et d'huile essentielle, de façon continue et le retour de l'excès d'eau à l'intérieur du ballon afin de maintenir le taux d'humidité propre au matériel végétal (Figure 9) (Chemat et Lucchesi, 2005). Ce procédé a été appliqué à divers types de plantes telles que les épices, les herbes aromatiques et les citrus (Farhat, 2010).

L'avantage de cette technique est qu'elle ne requière pas d'étape de purification après extraction contrairement à l'extraction par solvant qui nécessite la séparation de l'huile essentielle du solvant afin d'obtenir un extrait concentré (Chemat et al., 2004).

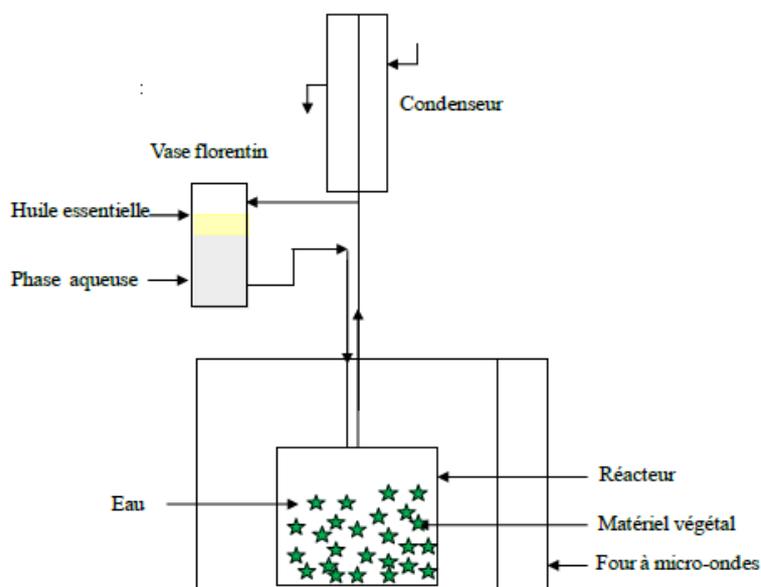


Figure 9: Schéma de l'extraction sans solvant assistée par micro-ondes (SFME)
(Farhat, 2010)

1.2.2.1.4 L'hydrodistillation sous pression réduite assistée par micro-ondes (VMHD)

L'hydrodistillation assistée par micro-ondes sous pression réduite ou VMHD (Vacuum Microwave HydroDistillation), est une méthode d'extraction élaborée et brevetée par la société Archimex en 1994 (Mengal et Mompon, 1994). Elle est basée sur l'utilisation conjointe des micro-ondes et d'un vide pulsé. Les micro-ondes favorisent le transfert des molécules vers le milieu extérieur alors que le vide pulsé permet l'entraînement azéotropique de celles-ci à une température inférieure à 100°C (Figure 10). Cette opération peut être répétée plusieurs fois en fonction du rendement souhaité (Chemat et Lucchesi, 2005).

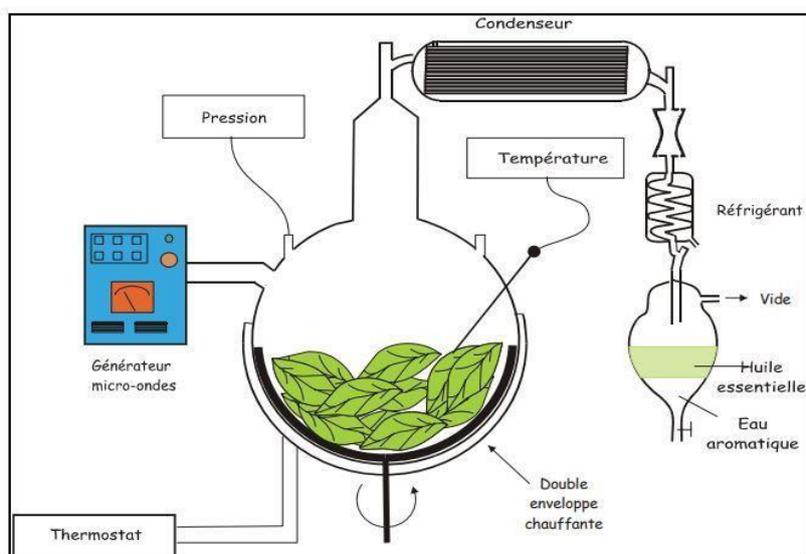


Figure 10: Schéma de l'hydro-distillation assistée par micro-ondes sous pression réduite (VMHD)
(Mengal et Mompon, 1994)

1.2.2.1.5 L'hydro-diffusion assistée par micro-ondes et gravité (MHG)

Cette méthode a été brevetée en 2008 par Chemat et coll. (Chemat et al., 2008). C'est une technique d'extraction économique et respectueuse de l'environnement qui est une combinaison du chauffage par micro-ondes et de l'effet de la force de gravité à pression atmosphérique. La MHG a été conçue pour des applications à échelle expérimentale et industrielle pour l'extraction d'huiles essentielles de différents types de plantes sans utilisation de solvant ni d'eau. Un système de refroidissement à l'extérieur du four à micro-ondes permet la condensation du distillat (Figure 11) (Rassem et al., 2016).

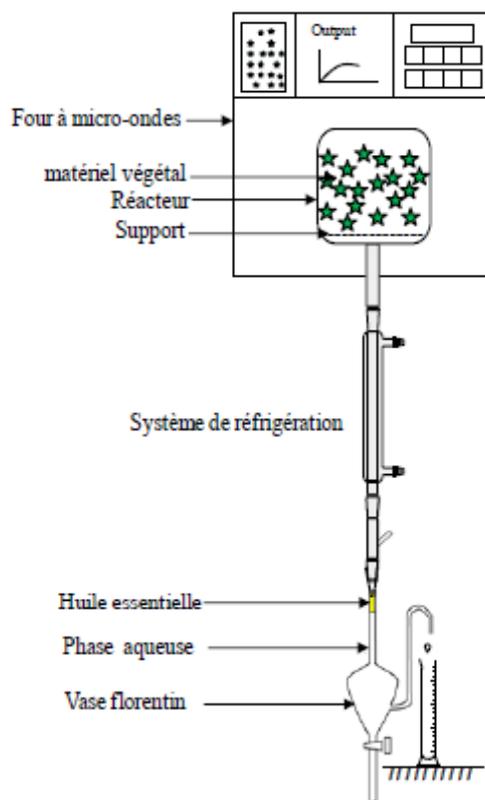


Figure 11: Schéma de l'hydro-diffusion assistée par micro-ondes et gravité (MHG)
(Farhat, 2010)

1.2.2.1.6 L'entraînement à la vapeur d'eau assisté par micro-ondes (MSD)

Cette technique développée par Sahraoui et ses Collaborateurs (Sahraoui et al., 2008), a été utilisée pour l'extraction des composés volatiles des fleurs de lavande. Elle est basée sur le principe de l'entraînement à la vapeur d'eau à la seule différence que les radiations micro-ondes sont uniquement exercées sur le ballon contenant la matière végétale, le reste du montage comportant le générateur de vapeur, le réfrigérant et le séparateur sont placés à l'extérieur du four (Figure 12).

Les résultats de l'étude de Sahraoui et ses collaborateurs ont montré une diminution du temps d'extraction, et une ouverture plus rapide des cellules dans le cas du traitement par microondes.

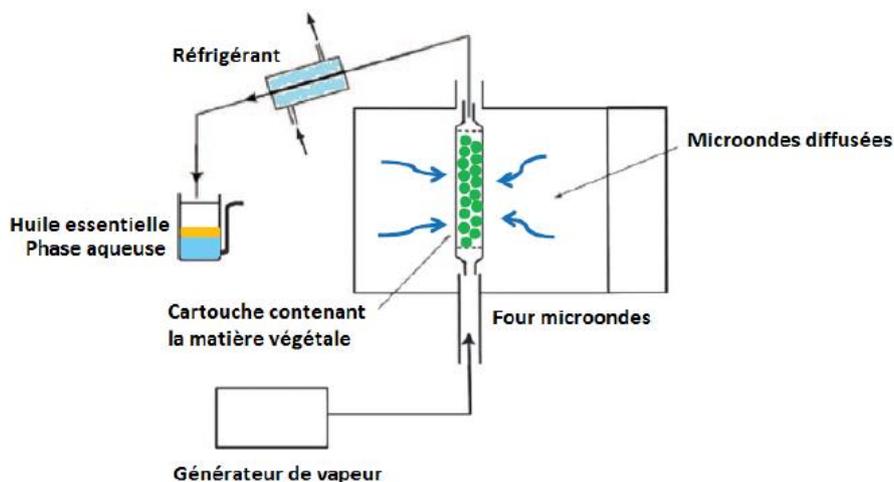


Figure 12: Schéma de l'entraînement à la vapeur assisté par microondes (MSD)
(Destandau et al., 2013)

1.2.2.1.7 L'entraînement à l'air assisté par micro-ondes (CAMD)

Cette technique appelée aussi CAMD (Compressed Air Microwave Distillation) est l'une des premières techniques d'extraction assistées par micro-ondes. Proposée par Craveiro et Coll. (Craveiro et al., 1989), elle a été utilisée pour l'extraction de l'huile essentielle de *Lippia Sidoides* sans utilisation de solvant. Elle consiste à injecter en continu de l'air comprimé dans le ballon d'extraction où la matière végétale est immergée dans de l'eau et chauffée par micro-ondes. La vapeur d'eau saturée en composants volatiles est entraînée vers un ballon de récupération plongé dans un système de refroidissement et situé à l'extérieur du four à micro-ondes (Figure 13) (Farhat, 2010). L'huile essentielle extraite en 5 minutes sous chauffage micro-ondes était qualitativement et quantitativement, identique à celle obtenue par méthode classique (entraînement à la vapeur) en 60-90 minutes.

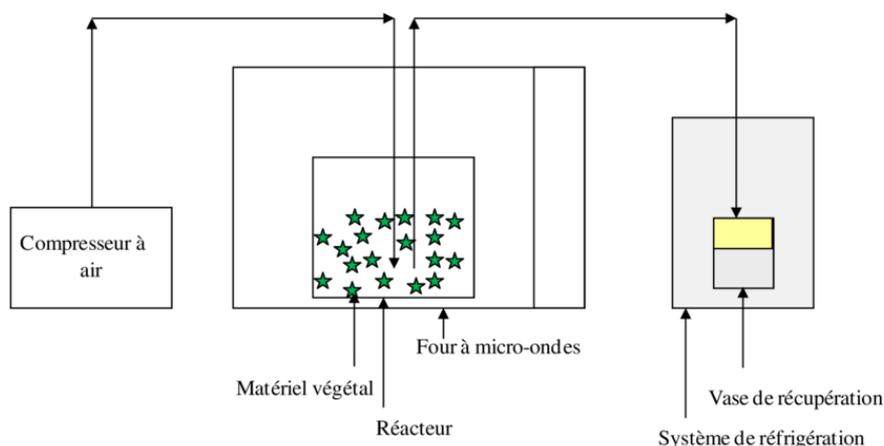


Figure 13: Schéma de l'entraînement à l'air assisté par micro-ondes (CAMD)
(Farhat, 2010)

1.2.2.1.8 L'hydro-diffusion assistée par micro-ondes (MSDf)

Ce procédé a été développé en 2009 par Farhat et ses collaborateurs (Farhat et al., 2009) en tant que nouvelle technique plus propre et plus efficace pour l'extraction des huiles essentielles de lavande, et a été comparé à la hydro-diffusion classique.

La vapo-diffusion assistée par microondes ou « Microwave Steam Diffusion » consiste à faire passer de la vapeur d'eau descendante à travers la matrice végétale se trouvant dans un réacteur placé dans un four à micro-ondes. De la même manière que les autres procédés, l'huile est extraite par la vapeur puis véhiculée vers un système de refroidissement pour récupérer l'essence extraite (Figure 14).

Cette méthode était plus performante que la méthode classique en termes d'économie d'énergie, de propreté et de réduction des eaux résiduelles.

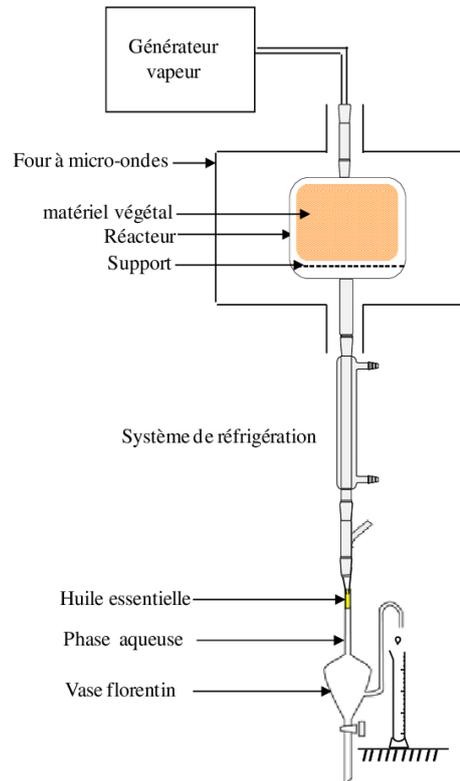


Figure 14: Schéma de la hydro-diffusion assistée par microondes (MSDf)
(Farhat et al., 2009)

1.2.2.2 Extraction par fluide super critique (SFE)

L'extraction par fluide supercritique est le procédé de séparation d'un composant (l'huile essentielle) d'un autre (la matrice végétale) en utilisant un fluide supercritique comme solvant d'extraction. Ce dernier est un fluide dont la pression et la température sont supérieures aux valeurs critiques, et donc l'état gazeux et l'état liquide ne sont plus distinguables. Ceci confère à ces fluides des propriétés moléculaires particulières, intermédiaires entre le liquide et le gaz (Camel, 2001).

En pratique, plus de 90 % des extractions par fluide supercritique sont réalisées avec du dioxyde de carbone (CO_2) pour plusieurs raisons pratiques. En plus d'avoir une pression et une température critiques relativement basses (74 bars et 32°C), le CO_2 est non toxique, non inflammable, non corrosif, sûr, disponible en grande pureté à un coût relativement faible et est facilement éliminé de l'extrait. De plus son utilisation en tant que solvant permet de valoriser ce gaz à effet de serre (Rassem et al., 2016). Le principal inconvénient du CO_2 est qu'il n'est utilisé que pour les composés très peu voire non polaires.

Une unité classique d'extraction par fluide supercritique contient une pompe à haute pression qui assure la circulation du fluide, et une cellule d'extraction contenant l'échantillon (végétaux broyés) où une pression et une température exactes doivent être maintenues. L'huile essentielle est alors dissoute dans le fluide traversant la cellule. Après détente, le fluide sortant de l'extracteur se sépare du composé extrait en passant par un dispositif

contenant une phase organique ou un solide, avant d'être envoyé dans le liquéfacteur pour être réutilisé (Figure 15).

Cette méthode d'extraction produit un meilleur rendement, un coefficient de diffusion plus élevé et une viscosité plus faible. Néanmoins, elle est très coûteuse en raison du prix de l'équipement nécessaire à ce procédé et elle n'est pas facile à manipuler (Bali et Belblidia, 2015).

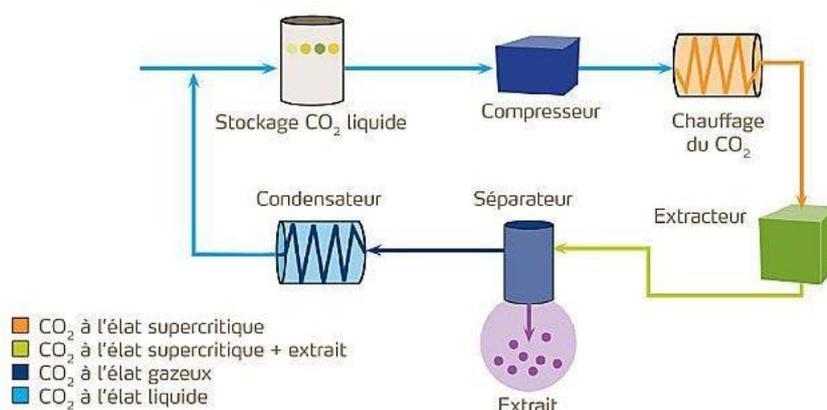


Figure 15: Schéma de l'extraction par CO₂ supercritique
(Bouaine, 2017)

1.2.2.3 Extraction par liquide pressurisé (PLE)

Cette technique, plus récente que l'extraction par fluide supercritique, dérive en partie de celle-ci. La différence demeure dans le fait que le solvant est maintenu à l'état liquide et n'atteint pas l'état critique. Une forte pression est appliquée au niveau des extracteurs afin d'arriver à des températures élevées. Les fortes températures atteintes offrent des extractions meilleures et plus rapides (Camel, 2001). Cette méthode est dédiée aux matrices solides (elle est également appelée extraction par un solvant chaud sous pression – PSE, ou extraction accélérée par solvant – ASE). Elle a été introduite en 1995 afin de remédier à certains problèmes associés aux techniques d'extraction solide-liquide classiques qui utilisent de grandes quantités de solvants et nécessitent un temps d'exposition long pour les expérimentateurs.

1.2.2.4 Extraction par pervaporation

La pervaporation est définie comme une technique de séparation assez récente d'un mélange liquide. Elle consiste en la vaporisation partielle à travers une membrane dense possédant une affinité envers l'un des constituants.

En plus de ses applications dans le domaine de déshydratation des solvants organiques et comme procédé d'épuration des alcools, la pervaporation peut aussi être utilisée comme technique d'extraction des huiles essentielles. Ce procédé a été utilisé par Figoli et coll.

(Figoli et al., 2006) pour l'extraction de l'huile essentielle de bergamote. Une huile de bergamote sans bergaptène (substance indésirable photoactive) a été produite en une seule étape permettant ainsi l'obtention d'une huile essentielle commercialisable de qualité et ce, à un moindre coût.

1.2.2.5 Extraction assistée par ultrasons (UAE)

Comme son nom l'indique, cette technique fait usage des ultrasons qui sont des ondes vibratoires mécaniques dont la fréquence varie entre 16 kHz et 1 GHz, pouvant se propager dans tous types de milieux (gaz, liquide ou solide). Cette technique a été développée en laboratoire par Vinatoru et Coll. en 1950 (Vinatoru, 2001).

Les ultrasons, combinés avec d'autres méthodes, telles que l'extraction par solvant ou l'hydrodistillation, permettent l'extraction sélective des huiles essentielles libérées par la matière végétale. Les ondes ultrasons créent des cycles successifs de compression et de dilatation provoquant la rupture des parois cellulaires et la libération des composés contenus, ce qui contribue à l'amélioration de l'extraction et permet une meilleure pénétration du solvant et donc un meilleur contact entre phases. Les ultrasons permettent également une agitation mécanique du liquide en contact avec la matière végétale, ce qui améliore le transfert.

Le principe de la méthode est d'immerger la matière végétale dans de l'eau ou dans un autre solvant (méthanol, éthanol, ...etc.), et la soumettre en même temps aux ultrasons (Figure 16). Les ultrasons sont beaucoup utilisés à l'échelle laboratoire (extraction des caroténoïdes, huiles essentielles, antioxydants, arômes, etc.) comme à l'échelle industrielle (Rassem et al., 2016).

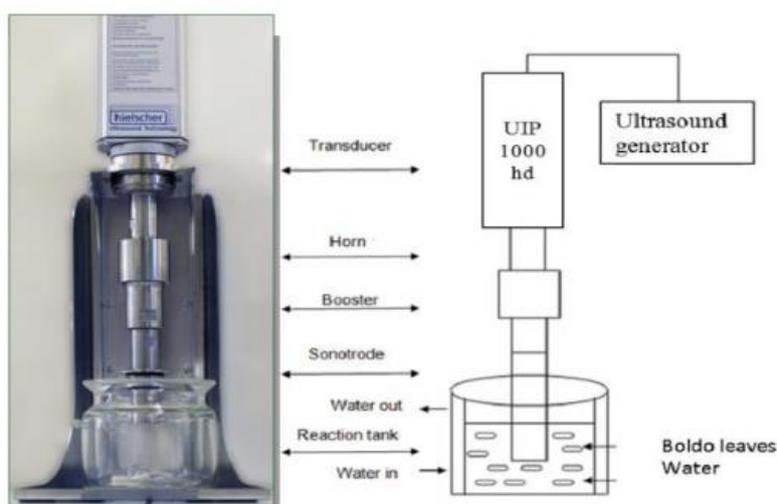


Figure 16: Schéma de l'extraction assistée par ultrasons (UAE)

(Rassem et al., 2016)

1.2.2.6 Extraction par chauffage ohmique

Cette méthode se distingue des méthodes conventionnelles utilisant un chauffage classique, par l'utilisation d'un courant électrique, généralement alternatif, appliqué directement à la matière végétale. Le courant électrique est transmis au milieu à l'aide des électrodes plongées dans le ballon d'extraction (Figure 17). Vu que l'huile essentielle n'est pas un matériau conducteur d'électricité, il est nécessaire d'ajouter des ions dans le milieu d'extraction, ceci est garanti par l'utilisation d'une eau salée qui n'a aucune influence sur la qualité de l'huile essentielle obtenue (Gavahian et al., 2012). Cette nouvelle méthode, énergétiquement efficace, peut être facilement transposable à l'échelle industrielle que l'extraction assistée par microondes par exemple. Le principal avantage de cette technique est le chauffage uniforme de la matrice végétale.

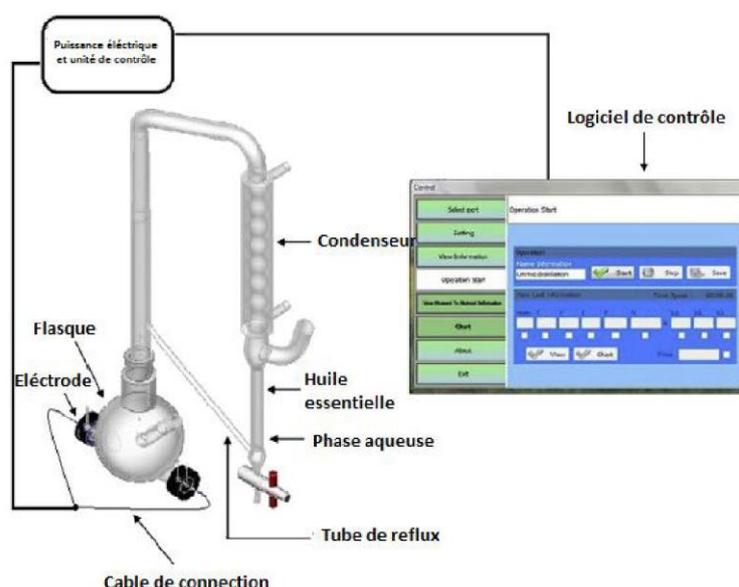


Figure 17: Schéma de l'extraction par chauffage ohmique (Gavahian et al. 2012)

1.2.3 Avantages et inconvénients des méthodes d'extraction

Les principaux avantages et inconvénients de méthodes d'extraction des huiles essentielles présentées précédemment sont donnés dans le tableau 1 :

Tableau 1: Avantages et inconvénients des méthodes d'extraction des huiles essentielles

Procédé	Avantages	Inconvénients
Distillation par entraînement à la vapeur	<ul style="list-style-type: none"> - Réduit la température de distillation. - Huile essentielle de très bonne qualité. - Cette technique ne met pas en contact direct l'eau et la matière végétale (De Silva, 1995). 	<ul style="list-style-type: none"> - La durée d'extraction est longue (Souvent plusieurs heures d'extraction). - Rendement d'extraction moyen (De Silva, 1995).
Hydrodistillation	<ul style="list-style-type: none"> - Huile essentielle de très bonne qualité. - Contact direct entre l'eau et la matière végétale (De Silva, 1995). 	<ul style="list-style-type: none"> - Grandes quantités d'eau nécessaires. - Rendement d'extraction moyen. - Un temps d'extraction plus long. - Un chauffage prolongé et trop puissant engendre la dégradation de certains molécules aromatiques (De Silva, 1995).

Expression à froid	<ul style="list-style-type: none"> - Huile essentielle de très bonne qualité. - Procédé plus simple à réaliser, sans chauffage. - Ne modifie pas le produit obtenu (De Silva, 1995). 	<ul style="list-style-type: none"> - Des rendements faibles - La durée d'extraction est moyenne. - L'utilisation de grandes quantités d'eau. - Réservée à l'extraction des essences volatiles contenues dans les péricarpes d'agrumes (De Silva, 1995).
Vapo-diffusion (hydro-diffusion)	<ul style="list-style-type: none"> - Meilleur rendement en huile avec bonne qualité. - Un temps de traitement court ce qui permet d'économiser l'énergie et donc de consommer moins de vapeur. - Rapide donc moins nocive pour les composés volatils. - Ne pas mettre en contact le matériel végétal et l'eau (De Silva, 1995). 	<ul style="list-style-type: none"> - Extraction de certaines substances non volatiles.
Distillation «sèche»	<ul style="list-style-type: none"> - La température à laquelle se déroule l'extraction est inférieure à 100°C, ce qui évite la dénaturation de certaines molécules thermosensibles. - Huile essentielle de bonne qualité. - Se produit sans ajout d'eau ni de solvant organique (De Silva, 1995). 	<ul style="list-style-type: none"> - Des rendements extrêmement faibles en huile essentielle (De Silva, 1995).
Extraction assistée par Micro-ondes (MAE)	<ul style="list-style-type: none"> - Préservation de la composition chimique de l'huile essentielle . - Rendement élevé. - Extraction rapide. - Nécessite moins d'énergie et de solvant. - La température peut dépasser le point d'ébullition du mélange. - Moins polluante. - Sécurisée et contrôlée (Chemat et Lucchesi, 2005). 	<ul style="list-style-type: none"> - Détérioration des constituants odorants par les Micro-Ondes qui possèdent une grande énergie de pénétration. - Coût d'investissement élevé. - Nécessite un matériel spécialisé.
Extraction assistée par ultra-sons (UAE)	<ul style="list-style-type: none"> - Rendement élevé. - Extraction rapide. - Agitation mécanique du liquide en contact avec la matière végétale, ce qui améliore le transfert. - Facile à mettre en oeuvre (Rassem et al., 2016). 	<ul style="list-style-type: none"> - Coûts d'investissement élevés. - Nécessite une étape de séparation (filtration) à partir du milieu d'extraction (Piochon, 2008).
Extraction par CO2 supercritique (SFE)	<ul style="list-style-type: none"> - Sélective en variant T et P. - Valorisation du CO₂. - Non-toxique. - Rapide. - Rendement élevé. - Pas de dégradation thermique (Rassem et al., 2016). 	<ul style="list-style-type: none"> - Couteuse et gourmande en énergie. - Difficile à manipuler. - Pression d'opération élevée. - Utilisée uniquement pour les composés non-polaires (Rassem et al., 2016).
Extraction par liquid pressurisé (PLE)	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilité d'opérer à de hautes températures. - Rapide. - Economique. - Temps d'exposition réduit pour l'opérateur (Camel, 2001). 	<ul style="list-style-type: none"> - Difficile à manipuler. - Pression d'opération élevée.
Extraction par chauffage ohmique	<ul style="list-style-type: none"> - Facilement transposable à échelle industrielle. - Chauffage uniforme de la matrice végétale (Gavahian et al., 2012). 	<ul style="list-style-type: none"> - Dégradation thermique de l'huile essentielle. - Consomme de l'énergie. - Nécessite une étape de séparation.

1.3 Composition des huiles essentielles (Franchomme et al., 2001; Morel, 2008; Couic-Marinier, 2013)

Les huiles essentielles sont des mélanges complexes pouvant renfermer plus de 300 constituants différents qui sont généralement liquides à température ambiante (30 à 40° C). Ces composés sont des molécules volatiles appartenant en grande majorité à la famille des terpènes (Bruneton, 1993; Ouamba, 1988; Sell, 2006).

L'analyse de diverses huiles essentielles a montré que certaines sont constituées d'un composant nettement majoritaire en plus d'une dizaine d'autres minoritaires. Alors que d'autres par contre, sont particulièrement complexes et peuvent contenir plus d'une centaine de composés tous de faible proportion. Par exemple, l'huile essentielle de girofle (*Eugenia caryophyllata*) est comme dans le premier cas constituée de 80 % d'eugénol (composé majoritaire), 10 % de β -caryophyllène et des petites quantités d'une dizaine d'autres produits. L'essence de vétiver (*Vetiveria nigritana*) est quand a elle composée de 160 constituants dont le plus abondant ne dépasse pas les 8 % (Ouamba, 1988).

Une huile essentielle est classée selon son constituant le plus abondant. Celui-ci peut être un hydrocarbure monoterpénique ou sesquiterpénique, un alcool, un époxyde, un aldéhyde, un composé phénolique, ...etc.

Les différents composés chimiques constituant l'huile essentielle sont cités ci-après :

1.3.1 Les Terpènes

Ce sont des molécules composées d'un nombre variable d'unités d'isoprène (Figure 18). Parmi ceux-ci on trouve les monoterpènes contenant 10 atomes de carbone (ou deux unités isopréniques), les sesquiterpènes de 15 atomes de carbone (ou trois unités isopréniques), les diterpènes de vingt atomes de carbone (ou quatre unités isopréniques), les triterpènes de trente atomes de carbone (ou 6 unités isopréniques), les tétraterpènes de quarante atomes de carbone (ou 8 unités isopréniques), ...etc. Seuls les terpènes les plus volatils, c'est-à-dire ceux dont la masse moléculaire n'est pas trop élevée, sont rencontrés dans les huiles essentielles soit les monoterpènes et les sesquiterpènes.

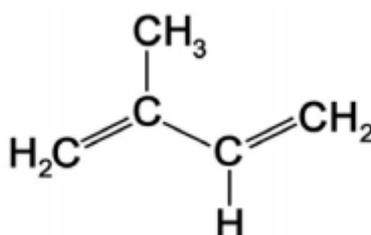


Figure 18: Une unité d'isoprène

Leurs effets thérapeutiques sont en général assez faibles, mais ils viennent nuancer ou compléter les actions des composants plus actifs. Ils présentent généralement une toxicité cutanée modérée. Ils peuvent provoquer des irritations, rougeurs et chaleur.

1.3.1.1 Les monoterpènes

Ils sont formés de deux unités d'isoprène (Figure 19). Ils s'ont légèrement des caractéristiques antiseptiques, stimulantes, expectorantes. Dans certains cas, ils peuvent être irritants pour la peau et les muqueuses.

- Le limonène dans *Citrus limonum* (citron, et en général, tous les zestes des Rutaceae) ;
- L'alpha-pinène dans *Pinus sylvestris* (pin sylvestre), ou *Juniperus communis* (genévrier) ;
- Le sabinène dans *Cinnamomum camphora* (ravintsara).

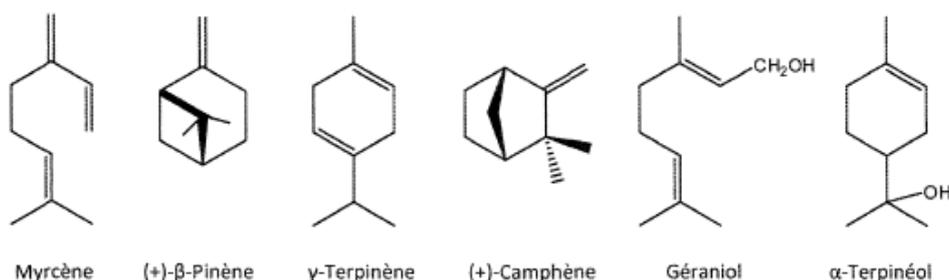


Figure 19: Exemples de structures de monoterpènes
(Piochon, 2008)

1.3.1.2 Les sesquiterpènes

Composés de trois unités d'isoprènes (Figure 20), ils sont présents dans de nombreuses HE. Ils présentent des activités bactéricides et anti-inflammatoires.

- Le β-caryophyllène, présent dans toutes les Lamiacées ;
- Le Germacrène D dans *Juniperus communis* (genévrier o.p. Baies) et dans *Cananga odorata* (ylang-ylang) ;
- Le chamazulène, dans *Matricaria recutita* (camomille allemande) ou *Tanacetum anuum* (tanaïsie annuelle).

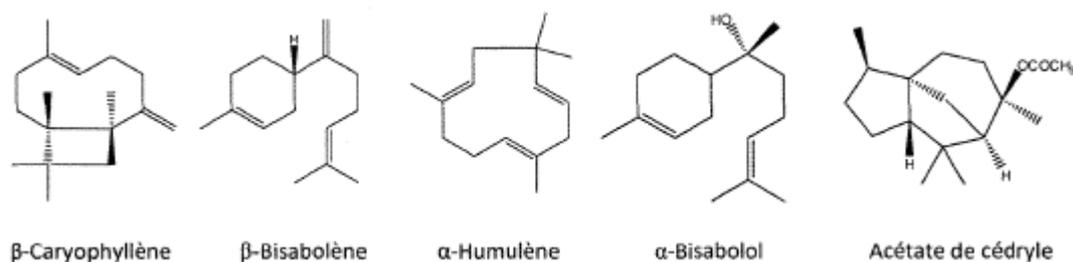


Figure 20: Exemples de structures de sesquiterpènes
(Piochon, 2008)

1.3.1.3 Les diterpènes

Quatre unités d'isoprènes donnent un diterpène, dont la masse moléculaire relativement élevée limite sa présence dans les HE obtenues par distillation par entraînement à la vapeur d'eau.

1.3.2 Les Alcools

Un alcool se forme quand un groupement hydroxyle (OH) se lie à un atome de carbone appartenant à une molécule (terpénique, aromatique,...). Les alcools présentent généralement des propriétés antiseptiques et antivirales. Ils ont de façon générale peu ou pas de toxicité (à l'exception du menthol).

Dans cette famille on trouve les composés suivants :

- Les monoterpénols ;
- Les sesquiterpénols ;
- Les diterpénols ;
- Les phénols.

1.3.2.1 Les monoterpénols

Quand une unité hydroxyle se joint à un monoterpène, il en résulte un monoterpénol. Ce sont de bons agents antibactériens, avec des propriétés stimulantes, réchauffantes, très bien tolérés, même chez les enfants.

- Le linalol dans *Thymus vulgaris linaloliferum* (thym vulgaire et linalol) (Figure 21);
- Le menthol dans *Mentha arvensis* (menthe des champs) (Figure 21).

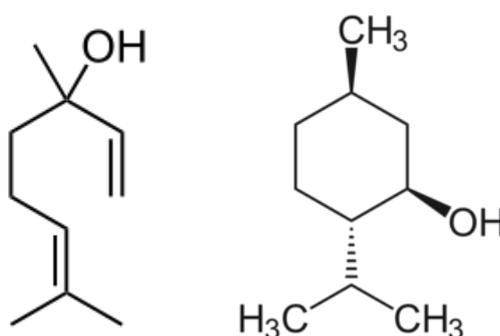


Figure 21: Structure du linalol et du menthol
(de gauche à droite)

1.3.2.2 Les sesquiterpénols

Produites à partir de la fixation d'un groupement hydroxyle sur un sesquiterpène, ces molécules manifestent des propriétés anti-inflammatoires et hépatoprotectrices.

- Le carotol dans *Daucus carota var. sativa* (carotte sauvage) (Figure 22) ;
- Le viridiflorol dans *Melaleuca quinquenervia* (niaouli) (Figure 22) ;
- Le cédrol dans *Cupressus sempervirens* (cyprès toujours vert) ou *Juniperus virginiana* (cèdre de Virginie) (Figure 22).

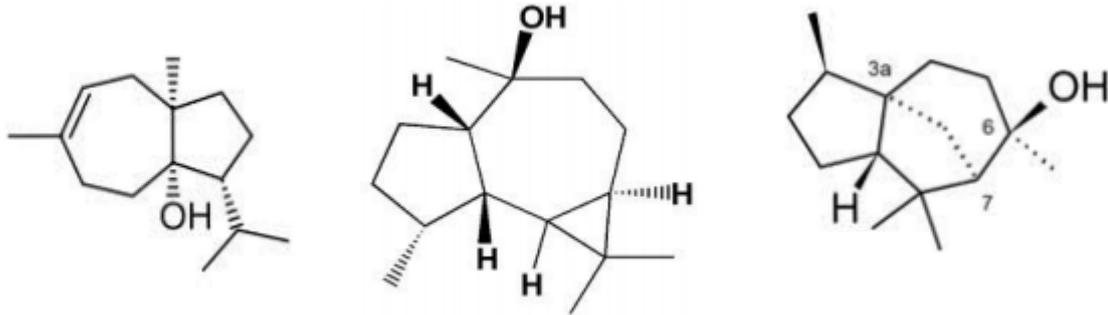


Figure 22: Structure du carotol, viridiflorol, cédrol (de gauche à droite)

1.3.2.3 Les diterpénols

Composés d'un hydroxyle lié à un diterpène, les diterpénols sont souvent, comme ces derniers, trop lourds pour être emportés par la vapeur d'eau. Ils présentent une similitude structurelle avec certaines hormones stéroïdiennes, et ont alors une action mimétique.

- Le sclaréol dans *Salvia sclarea* (saugé sclarée) (Figure 23).

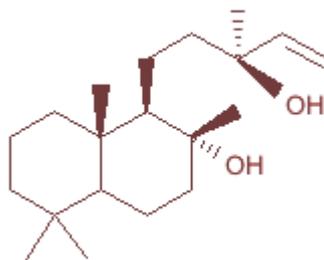


Figure 23: Structure du sclaréol

1.3.2.4 Les Phénols

Ce sont des alcools dans lesquels le groupement hydroxyle est fixé à un cycle aromatique d'atomes de carbone (Figure 24). Ce sont de puissants antibiotiques, à large domaine d'action, ainsi que de bons virucides et antifongiques. Les HE qui en contiennent en grande proportion doivent être utilisées avec précaution à cause de leurs toxicité.

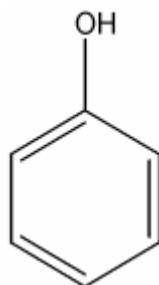


Figure 24: Structure du phénol

- Le carvacrol dans *Origanum compactum* (origan compact) ou de *Thymus vulgaris carvacroliferum* (thym ct carvacrol) (Figure 25) ;
- Le thymol dans *Thymus vulgaris thymoliferum* (thym ct thymol) (Figure 25) ;
- L'eugénol dans *Eugenia caryophyllus* (clou de girofle) ou de *Cinnamomum zeylanicum* (cannelier de Ceylan) (Figure 25).

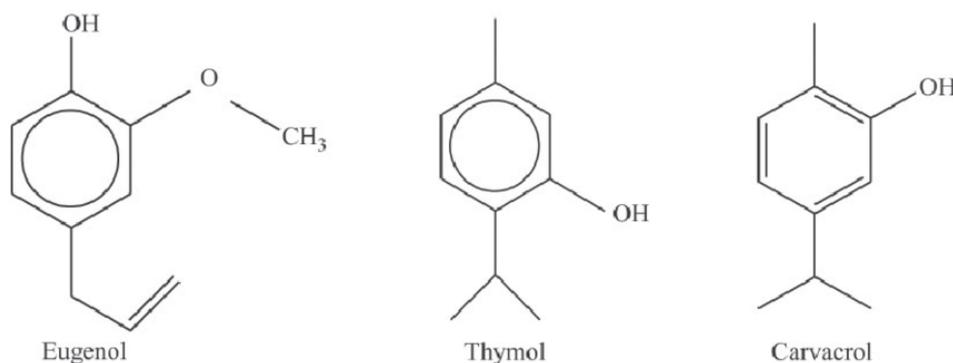


Figure 25: Principaux phénols présents dans les huiles essentielles
(Moghaddam et Mehdizadeh, 2017)

1.3.3 Les Phénols méthyl-éthers

La structure phénolée est soumise à une méthylation, faisant perdre à ces molécules la dermocausticité des phénols, et leur faisant acquérir de nouvelles propriétés : antispasmodiques puissants des muscles lisses, certains possèdent aussi des propriétés antiallergiques (chavicol méthyl-éther), ou antalgiques cutanés (eugénol méthyl-éther) (Figure 26).

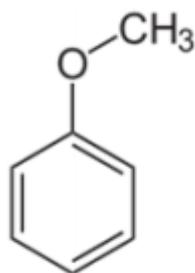


Figure 26: Phénol méthyl-éther

- Le chavicol méthyl-éther dans *Ocimum basilicum* var. *basilicum* (basilic tropical) ou *d'Artemisia dracunculus* (estragon) (Figure 27);
- L'eugénol méthyl-éther dans *Laurus nobilis* (laurier noble).

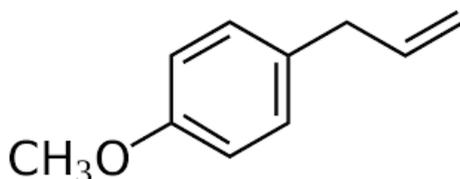


Figure 27: Structure du chavicol méthyl-éther

1.3.4 Les Oxydes

1.3.4.1 Les éthers-oxydes :

Venus des phénols méthyl-éthers, ils en possèdent le caractère positivant ; ils sont stimulants des glandes exocrines, antispasmodiques et antalgiques (Figure 28).

- L'apiole dans *Petroselinum sativum apioliferum* (persil simple et apiole) ;
- La myristicine dans *Myristica fragrans* (noix de muscade) ;
- Le safrole dans *Ocotea pretiosa* (sassafras).



Figure 28: Structures de quelques éthers oxydes présents dans les huiles essentielles (Al-Malahmeh et al., 2017)

1.3.4.2 Les oxydes terpéniques

Souvent rencontrés dans de nombreuses HE, ces composés sont formés par la fixation d'atomes d'oxygènes à des molécules de terpènes.

- Le 1,8-cinéole (eucalyptol) dans *Eucalyptus globulus* et *radiata*, dans *Cinnamomum camphora* (ravintsara), dans *Melaleuca quinquenervia* (niaouli), dans *Rosmarinus officinalis cineoliferum* (romarin et cinéole)... (Figure 29) ;
- L'ascaridol dans *Chenopodium ambrosioides* (chénopode) ;
- Le linaloloxyle dans *Hyssopus officinalis* var. *decumbens* (hysop couchée) ;

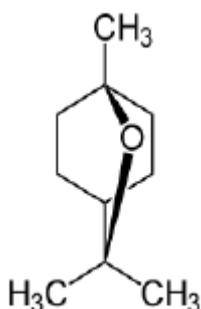


Figure 29: Structure du 1,8-cinéole

1.3.5 Les Aldéhydes

Formés suite à l'oxydation des alcools, les aldéhydes sont des molécules très volatiles qui libèrent souvent des odeurs puissantes (le citronellal est un bon répulsif). Elles possèdent des propriétés calmantes et anti-inflammatoires. Certaines sont antivirales (comme le géranial). Leur toxicité provoque une légère agressivité de la peau et des muqueuses. Cependant elle est en partie neutralisée par les terpènes contenus dans les HE à aldéhydes.

- Le citronnellal dans *Eucalyptus citriodora* (eucalyptus citronné) ou dans *Cymbopogon winterianus* (citronnelle de Java) ;
- Le géranial dans *Cymbopogon flexuosus* (lemongrass) (Figure 30);
- Le néral dans *Citrus aurantium* spp. *Bergamia* (petit grain bergamote).

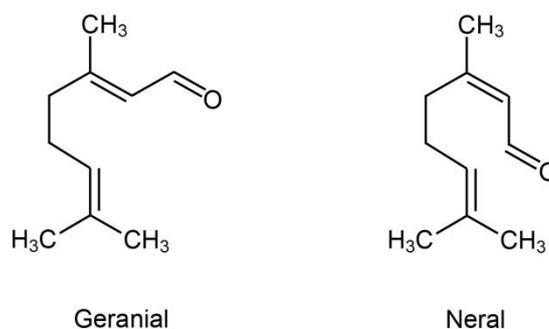


Figure 30: Structure de quelques aldéhydes présents dans les HE

1.3.6 Les Esters

Ils sont le produit de la réaction d'un acide carboxylique avec un alcool. Ce sont des composés négativants, spasmodiques, anticonvulsivants, anti-inflammatoires. Ils ne manifestent généralement pas de toxicité aux doses thérapeutiques.

- L'acétate de lavandulyle dans *Lavandula angustifolia* (lavande vraie) (Figure 31);
- L'acétate de néryle dans *Helichrysum italicum* (hélichryse italienne ou immortelle) ;
- Le salicylate de méthyle dans *Gaultheria procumbens* (gaulthérie couchée) ou *G. fragrantissima* (gaulthérie odorante).

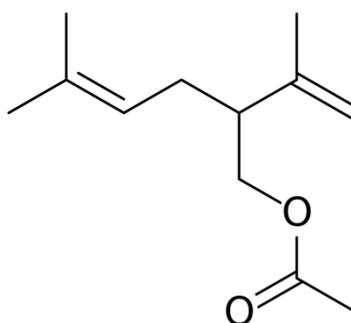


Figure 31: Structure de l'acétate de lavandulyle

1.3.7 Les Cétones

Ce sont des molécules très actives, dont les propriétés varient selon la dose employée : à faible dose elles sont stimulantes du système nerveux central, à doses plus élevées elles sont calmantes voire entraînant un état de stupéfaction. Et enfin à grandes doses, leur toxicité est redoutable.

- Les β -diones dans *Helichrysum italicum* (hélichryse italienne ou immortelle) ;
- Le bornéone (camphre) dans *Rosmarinus officinalis ct camphre* (romarin à camphre) ou dans *Cinnamomum camphora* (camphrier de Chine o.p. bois) (Figure 32);
- La verbénone dans *Rosmarinus officinalis verbenoniferum* (romarin ct verbénone) ;
- La ménthone et l'isomenthone dans *Mentha x piperita* (menthe poivrée).

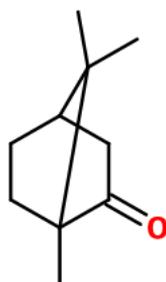


Figure 32: Structure du bornéone (camphre)

1.3.8 Les Lactones

Ce sont des molécules comportant une fonction oxyde et cétoxy à la fois. Elles sont relativement fragiles, et ne résistent souvent pas à la distillation, c'est pourquoi ce groupe est mal représenté parmi les HE.

- L' α -santonine dans *Artemisia maritima* (armoïse maritime) ;
- L'alantolactone dans *Inula graveolens* (inule odorante) ;

1.3.9 Les Coumarines

Fragiles, on ne les retrouve dans les HE que de quelques familles botaniques, telles que : les Apiaceae, les zestes des Rutaceae, les Astéracées.

- Les psoralènes et bergaptène dans *Citrus aurantium* spp. *Bergamia* (bergamote o.p. zeste) ;
- L'ombelliférone dans *Anethum graveolens* (aneth) (Figure 33);
- L'osthole dans *Angelica archangelica* (angélique) ;
- La coumarine dans *Cinnamomum zeylanicum* (cannelle de Ceylan o.p. écorce).

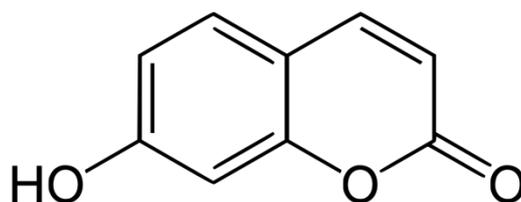


Figure 33: Structure de l'ombelliférone

1.3.10 Les Composés soufrés

Il est relativement rare de les rencontrer dans les HE, ces composés sont exclusifs à un petit nombre de familles botaniques : On les retrouve dans quelques Apiaceae (genre *Ferula*), les Liliacées (*Allium sativum* et *Allium cepa*), et les Brassicacées (*Brassica nigra*, *Brassica juncea*).

Ce sont généralement de bons anti-infectieux, mais ils sont fortement dermocaustiques, et leur emploi est délicat.

- L'allylpropyl disulfide dans l'*Allium cepa* (ail) ;
- Le diallyle disulfide dans l'*Allium sativum* (oignon) ;
- L'isothiocyanate d'allyle dans *Brassica juncea* (moutarde brune) ou dans *Brassica nigra* (moutarde noire).

1.3.11 Définition du chémotype

Au sein d'une même espèce de plante, la composition de l'huile essentielle des divers individus peut présenter de différents profils chimiques ou chémotypes. Ces différences sont au niveau de la nature et la teneur des composés majoritaires de l'huile essentielle. Deux plantes identiques, morphologiquement et caryologiquement, peuvent produire des essences de différentes compositions. Cette différence peut être extrêmement importante et changer les propriétés de l'huile essentielle du tout au tout. De ce fait, il est très important de connaître cette notion avant d'utiliser les huiles essentielles (Piochon, 2008; Franchomme et al., 2001).

1.4 Caractéristiques des huiles essentielles

En raison de l'importance des huiles essentielles dans les domaines de l'industrie, leur qualité est toujours imposée par les acteurs de ce domaine, depuis le producteur, en passant par l'industriel jusqu'au consommateur. Cette exigence se traduit nécessairement par l'établissement de normes de qualité définies par divers organismes tel que l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), l'Association Française de Normalisation (AFNOR),...etc. Ainsi, l'analyse des huiles essentielles porte à la fois sur les caractéristiques physico-chimiques et la composition chimique (AFNOR, 2011). Les analyses physico-chimiques concernent essentiellement les paramètres suivants :

- **la densité (d_{20}^{20}) :**

C'est le rapport de la masse volumique de l'HE à la masse volumique de l'eau distillée à 20°C. C'est une grandeur sans dimension mesurée selon la norme AFNOR NF T 75-111 à l'aide d'un pycnomètre. La plupart des HE sont plus légères que l'eau ; si elles contiennent des phénols, elles sont plus denses (AFNOR, 2011; Faucon, 2012).

- **L'indice d'acide (I_A) :**

C'est le nombre de milligrammes d'hydroxyde de potassium nécessaires à la neutralisation des acides libres contenus dans 1 g d'huile essentielle selon la norme AFNOR NF T 75-103. La teneur en acides libres augmente avec le temps ; l'indice d'acide permet ainsi de juger l'état de détérioration d'une HE (ISO, 1988; AFNOR, 2011).

- **L'indice de réfraction (n_{20}) :**

C'est le rapport entre le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction d'un rayon lumineux d'une longueur d'onde déterminée, passant à travers l'air puis l'HE à 20°C. Il s'agit d'une grandeur sans unité, qui se mesure avec un réfractomètre d'après la norme AFNOR NF T 75-112 (AFNOR, 2011).

- **Le pouvoir rotatoire :**

C'est la propriété d'un milieu de faire tourner le vecteur d'un faisceau lumineux le traversant. Il s'agit de l'angle, exprimé en milli-radians ou degrés d'angle, selon lequel tourne le plan de polarisation d'une radiation lumineuse lorsqu'elle traverse une solution contenant des molécules chirales. La mesure est effectuée à l'aide d'un polarimètre et se fait selon la norme AFNOR NF T 75-113. Pour les valeurs positives, la substance étudiée est dite dextrogyre et pour les valeurs négatives elle est lévogyre (AFNOR, 2011).

- l'indice d'ester (I_E) :

Il correspond au nombre de milligrammes d'hydroxyde de potassium nécessaire à la neutralisation des acides libérés par l'hydrolyse des esters contenus dans 1 gramme d'HE. Il se détermine d'après la norme AFNOR NF T 75-104 par chauffage pendant 30 minutes des esters présents dans l'HE en solution éthanolique d'hydroxyde de potassium (saponification) de concentration connue et par dosage en retour de l'excès de base par une solution d'acide chlorhydrique (AFNOR, 2011).

A ces paramètres, on peut aussi ajouter les caractéristiques organoleptiques telles que l'aspect, la couleur et l'odeur.

Remarque : Les normes citées précédemment ont été annulées et mises à jour, cependant, elles restent toujours valables.

1.5 Méthodes d'analyse des huiles essentielles

Une connaissance parfaite de la composition chimique des huiles essentielles est nécessaire aux industriels pour en contrôler la qualité et la régularité en vue d'une bonne commercialisation et pour y déceler une éventuelle spécificité en vue de sa valorisation. En effet, ces huiles essentielles constituent souvent une matière première destinée à des secteurs aussi divers que la parfumerie, la cosmétique, la pharmacie et l'agroalimentaire. Quel que soit le secteur concerné, l'analyse des huiles essentielles reste une étape importante, bien que malgré l'évolution continue des méthodes de séparation et d'identification, un processus délicat qui nécessite la mise en œuvre de différentes techniques (Sandra et Bicchi, 1987)

Il existe plusieurs méthodes d'analyse des huiles essentielles parmi ces méthodes on trouve la Chromatographie en Phase Gazeuse couplée à la Spectrométrie de Masse CG-SM ou en anglais Gas Chromatography-Mass Spectrometry GC-MS est une technique d'analyse qui combine à la fois les performances de la chromatographie en phase gazeuse, pour séparer les composés d'échantillons, et la spectrométrie de masse, pour détecter et identifier les composés. Cette technique permet l'identification et/ou la quantification précise d'un très grand nombre de composés présents dans le mélange à analyser (Mc Lafferty et Stauffer, 1994).

1.6 Conclusion

L'extraction des huiles essentielles a fait l'objet de nombreuses recherches au cours des dernières années. Plusieurs méthodes ont été développées et brevetées afin d'aboutir à des méthodes plus performantes du point de vue de leur durée, leur efficacité, leur rendement, leur coût, et leur respect de l'environnement.

De nouvelles méthodes plus innovantes ont été développées pour remédier aux problèmes posés par les méthodes classiques. Les procédés assistés par micro-ondes en sont un exemple assez connu. Ces procédés impliquent l'utilisation de radiations micro-ondes pour chauffer la

matière végétale. D'autres méthodes proposent aussi l'utilisation d'ultrasons ou tout simplement le chauffage ohmique.

La connaissance de la composition chimique et des propriétés physico-chimiques de l'huile essentielle obtenue par les différentes méthodes d'extraction et à partir de diverses plantes est importante pour juger de l'efficacité de la méthode utilisée et identifier les différents facteurs influençant cette composition. Afin d'accéder à ces informations plusieurs méthodes d'analyse et de caractérisation existent. Parmi celles-ci se trouve le couplage en ligne CG-SM qui constitue l'une des meilleures méthodes d'analyse des huiles essentielles et permet d'identifier et/ou de quantifier précisément un nombre très important de composés dans le mélange à analyser.

Chapitre 2

Travaux antérieurs

2.1 Introduction

Dans ce travail, nous avons choisi d'étudier quatre plantes aromatiques qui peuvent être utilisées dans notre vie quotidienne (cuisine, parfums,...etc.) ainsi que dans les différents domaines de l'industrie (pharmaceutique, agroalimentaire,...etc.) : le romarin (*Rosmarinus Officinalis* L.), le pistachier (*Pistacia Lentiscus* L.), la menthe verte (*Mentha spicata* L.) et l'anis vert (*Pimpinella anisum* L.). Ce chapitre rassemble les données recueillies de plusieurs travaux antérieurs et comprendra une présentation des quatre substrats végétaux, la composition chimique et le rendement en huile essentielle ainsi que les paramètres influençant ces derniers, et enfin la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de chaque plante. La connaissance de ces données permettra d'avoir une idée globale sur les caractéristiques de chaque substrat et d'exploiter ces résultats qui sont nécessaires pour une transposition à l'échelle de production.

2.2 Présentation des substrats végétaux

2.2.1 *Rosmarinus officinalis* L. (Romarin)

2.2.1.1 Origine

Le romarin (*Rosmarinus officinalis* L.) (Figure 34) est une plante aromatique et médicinale appartenant aux Lamiacées, une famille qui comprend 200 genres et environ 3200 espèces végétales dont 40% sont aromatiques. Cette plante a la forme d'un petit arbrisseau pouvant atteindre 1 à 2 mètres de haut sur lequel poussent des feuilles de couleur verte foncée en forme d'aiguilles aux bords recourbés. Ses fleurs minuscules peuvent être blanches, roses, violettes ou bleues (Al-Sereiti et al., 1999).

Le romarin est originaire d'Europe du Sud et d'Asie, mais il est aussi cultivé dans le bassin méditerranéen et en Inde (Who, 2007; Kokate et al., 2010). Les feuilles de romarin sont largement utilisées dans la cuisine méditerranéenne comme épices et arômes (Lešnik et al., 2021).

Le romarin pousse principalement dans les endroits sablonneux et pierreux ainsi que sur les falaises près de la mer. En général, cette plante préfère les sols secs et les zones ensoleillées (Miraldi et al., 2010). Elle peut être cultivée dans les jardins, sa reproduction peut être réalisée à l'aide de boutures ou de graines, bien qu'avec les graines la reproduction est plus lente (Kokate et al., 2010).

En climat méditerranéen, cette plante fleurit généralement entre mai et juin. Les feuilles sèches ou fraîches ou même les parties aériennes entières de la plante sont utilisées pour produire des extraits ou des huiles essentielles (Borges et al., 2019).

L'huile essentielle de romarin est pratiquement incolore. Son odeur vivifiante varie selon les variétés de romarin mais, généralement, elle est plutôt riche, aromatique, puissante et camphrée. L'huile est insoluble dans l'eau, soluble dans 10 volumes d'alcool à 80%. Elle est principalement composée de : pinènes, camphre, 1,8 cinéole (Kokate et al., 2010).



Figure 34: *Rosmarinus Officinalis* L. (le romarin)

(Winter, 2020)

2.2.1.2 Localisation de l'HE de romarin

Selon Perrot (Perrot, 1928), L'huile essentielle de romarin est produite par des poils sécréteurs irrégulièrement ramifiés, abondants à la face inférieure et quelques rares poils unicellulaires courts à la face supérieure des feuilles (Figure 35). Des glandes uni et pluricellulaires sont aussi signalées à la surface des feuilles et des tiges. Cette structure est caractéristique de la famille des lamiacées. Les poils sécréteurs (Figure 36) sont des trichomes glandulaires capités pouvant synthétiser et contenir l'huile essentielle.

L'étude de boutekedjiret (Boutekedjiret, 1999) a permis de confirmer les observations de Perrot, elle a aussi permis de mettre en évidence la présence de dépôts endogènes de l'huile essentielle.

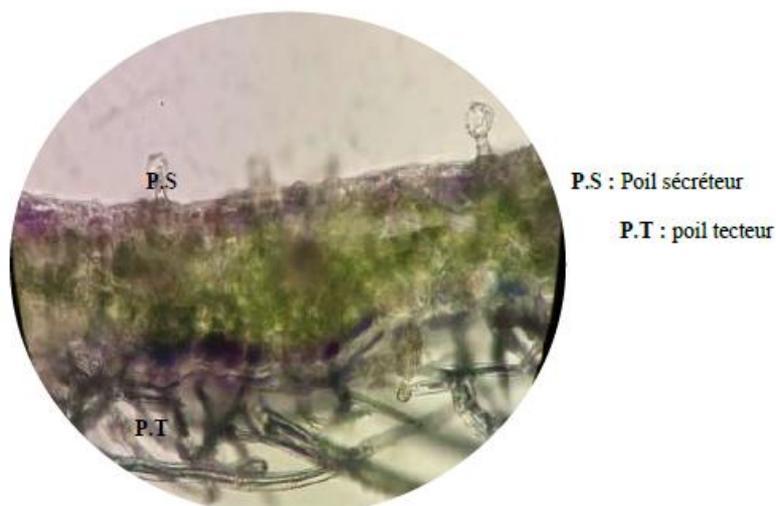


Figure 35: Coupe transversale de la feuille de *Rosmarinus officinalis* L. Poils épidermiques (Bouleazzen, 2017)



Figure 36: Poil sécréteur chez le *Rosmarinus officinalis* L.
(Boulezaen, 2017)

2.2.1.3 Propriétés physico-chimiques et organoleptiques

Les propriétés organoleptiques de l'HE de *Rosmarinus officinalis* données par les normes AFNOR (AFNOR, 1994) sont :

- **Aspect** : liquide mobile, limpide.
- **Couleur** : liquide incolore à jaune pâle ou jaune verdâtre.
- **Odeur caractéristique** : agreste (champêtre), cinéolée, plus ou moins camphrée.

Le Tableau 2 donne les valeurs de référence des propriétés physicochimiques de l'HE de romarin provenant de différents pays. La variation de ces propriétés d'une région à une autre n'est pas très grande.

Tableau 2: Propriétés physico-chimiques de l'HE de *Rosmarinus officinalis*

Pays	Méthode d'extraction	Densité d_{20}^{20}	Indice de réfraction n_{20}	Pouvoir rotatoire	Indice d'acide I_a	Indice d'ester	Référence
Tunisie et Maroc (1,8 cinéole)	-	0,907 - 0,920	1,4640 - 1,4700	-2° à +5°	1	2 à 15	(AFNOR, 1994)
Espagne (camphre)	-	0,892 - 0,910	1,4640 - 1,4720	-5° à +8°	1	2 à 15	(AFNOR, 1994)
Algérie	SD	0,8983	1,4695	-	1,53	-	(Boutekdjiret, 1999)
France	SD	0,895-0,916	1,4670-1,4740	-	1	-	(AFNOR, 1987)
Espagne	SD	0,895-0,905	1,4670-1,4730	-	1	-	(AFNOR, 1994)
Portugal	SD	0,860-0,880	1,4660-14750	-	1	-	(AFNOR, 1987)

2.2.1.4 Usages

Le romarin renferme une huile essentielle à laquelle il doit ses précieuses propriétés ; il est connu pour ses propriétés antioxydantes, antimicrobiennes, analgésiques, anti-inflammatoires et anti-ulcérogènes.

Les huiles essentielles et les extraits obtenus à partir des fleurs et des feuilles de romarin sont encore largement utilisés pour traiter les blessures mineures, les éruptions cutanées, les maux de tête, la dyspepsie et les coliques néphrétiques (Begum et al., 2013). En se basant sur des connaissances traditionnelles, le monde scientifique s'est intéressé aux diverses activités pharmacologiques du romarin. En effet, il stimule le fonctionnement de la vésicule biliaire, il agit sur les fermentations intestinales et sur les douleurs abdominales qu'elles entraînent, il calme aussi la toux et contribue au confort de l'asthmatique. Il est tonicardiaque, hypotenseur décongestionnant veineux, régulateur hépatique etc. (Lešnik et al., 2021).

2.2.2 *Pistacia lentiscus* L. (Pistachier)

2.2.2.1 Origine

Connu sous le nom de « Derw » ou « Darw » en arabe local, lentisque et arbre au mastic en Français et lentisk en Anglais, le pistachier (*Pistacia lentiscus*) est un arbuste pouvant atteindre entre 3 et 6 mètres en hauteur, de la famille des anacardiacees qui comprend environ 70 genres et plus de 600 espèces (Coste, 1937).

Le pistachier caractérisé par : une odeur résineuse forte, des feuilles persistantes et des fleurs aromatiques. Les fleurs mâles sont rouges foncé tandis que les fleurs femelles sont vert jaunâtre. La floraison a lieu de mars à mai. Le fruit est une petite drupe arrondie d'environ 5 mm. D'abord rouge, puis elle devient noire (Quezel et Santa, 1963).

Cet arbuste est originaire des régions du sud de l'Europe, de l'Asie et de l'Afrique, régions où son huile est encore consommée de diverses manières.

Pistacia lentiscus L. (figure 37) est une espèce sauvage, thermophile, largement répandue dans les écosystèmes extrêmes de la région méditerranéenne (Seigne, 1985). On le rencontre également en Europe, Asie, et en Afrique. En Algérie, on le retrouve sur tout type de sol, bien qu'il préfère les terrains siliceux (Coste, 1937). Il occupe l'étage thermo-méditerranéen. Sa limite méridionale se situe aux environs de Saida et sa présence au sud de l'Atlas saharien n'est pas signalée (Green et al., 2005).



Figure 37 : *Pistacia lentiscus* L. (le pistachier)
(Scholz, 2016)

2.2.2.2 Localisation de l'HE dans la plante

Des observations microscopiques (figures 38, 39 et 40) ont été effectuées sur les coupes réalisées sur les feuilles et les tiges de lentisque montrent l'existence des canaux sécréteurs ce qui indique la présence des dépôts exogènes et endogènes de l'huile essentielle (Nacer-Bey, 2003).

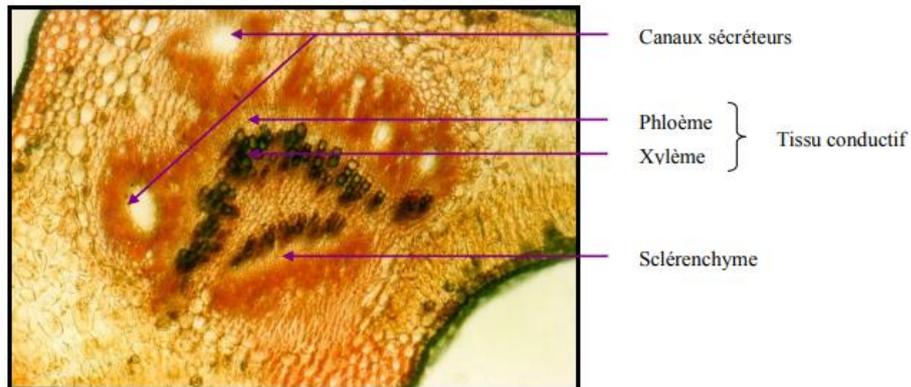


Figure 38: Coupe transversale de la nervure principale de la feuille de *Pistacia lentiscus*
(Nacer-Bey, 2003)

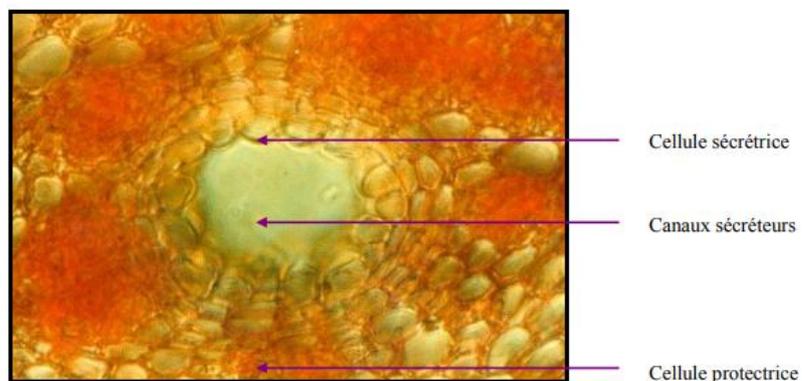


Figure 39: Coupe transversale de la feuille de *Pistacia lentiscus* montrant les conduits sécréteurs
(Nacer-Bey, 2003)

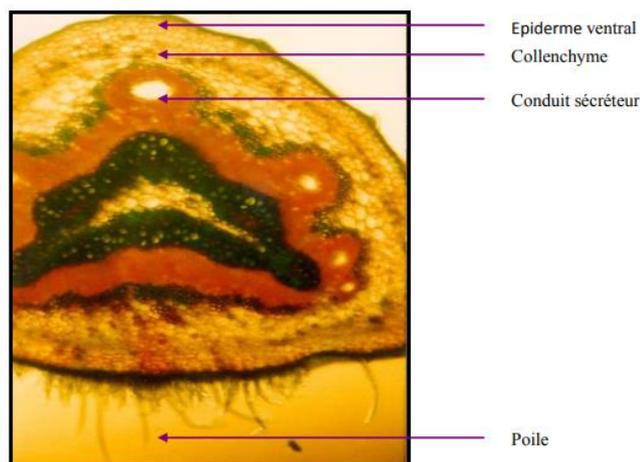


Figure 40: Coupe transversale de la tige de *Pistacia lentiscus* (Nacer-Bey, 2003)

2.2.2.3 Propriétés physico-chimiques et organoleptiques

Les propriétés organoleptiques de l'huile essentielle de pistachier ont porté sur l'étude de l'aspect, l'odeur ; et la couleur. Les tableaux 3 et 4 représentent respectivement les propriétés organoleptiques ainsi que les paramètres physico-chimiques de l'HE du lentisque d'études antérieures.

Tableau 3: Propriétés organoleptiques de l'HE du *Pistacia lentiscus*

Origine	Aspect	Odeur	Couleur	Référence
-	Liquide, mobile et limpide	Caractéristique	Jaune pâle	(AFNOR, 2000)
Alger (Forêt de Bainem)	Liquide visqueux	Herbacée épicée	Jaune verdâtre	(Nacer-Bey, 2003)
Tipaza	Liquide, mobile et limpide	Caractéristique	Jaune pâle	(Amara et al., 2019)

Tableau 4: Paramètres physico-chimiques de l'HE du *Pistacia lentiscus*

Région	Partie de la plante	Indice de réfraction n_{20}	Pouvoir rotatoire à 25°C	Indice d'ester	Indice d'acide	Densité relative d_{20}^{20}	Référence
-	-	<5	-	55-72	<10	0,884- 0,912	(AFNOR, 2000)
Tipaza	Feuilles	1.4749	-24.00	-	-	-	(Mecherara-Idjeri, 2007)
	Fruits	1.4749	-8.10	-	-	-	
	Rameaux	1.4849	-16.13	-	-	-	
Alger	Feuilles	1.4859	-20.83	-	-	-	
	Fruits	1.4735	+11.22	-	-	-	
	Rameaux	1.4790	+20.51	-	-	-	
Jijel	Feuilles	1.4923	-11.11	-	-	-	
	Fruits	1.4710	+14.28	-	-	-	
	Rameaux	1.4793	+35.71	-	-	-	
Tipaza	fruits	3,65		68,29	1,7	0,911	(Amara et al., 2019)

2.2.2.4 Usages

Le *Pistacia lentiscus* L. renferme une huile essentielle à laquelle il doit ses propriétés intéressantes ; il est connu pour ses propriétés : antioxydantes, anti-inflammatoires, antimicrobiennes, antifongiques et anti-athérogènes (Dedoussis et al., 2004).

Cette huile essentielle est connue pour ses vertus thérapeutiques en ce qui concerne les problèmes circulatoires, les ulcères de l'estomac et a des propriétés d'une grande valeur décongestionnante (veineuse, lymphatique, prostatique). Elle est indiquée particulièrement contre les varices, varicosités, hémorroïdes et congestions utérines (Balan et al., 2005).

Elle est également utilisée dans le domaine cosmétique dans la fabrication du savon (Magiatis et al., 1999), la préparation des produits de beauté. Et en application externe, locale, sous forme d'onguent pour soigner les brûlures et les douleurs dorsales.

En Algérie, l'huile essentielle de lentisque a été utilisée dans la médecine traditionnelle pour ses effets pharmacologiques en tant qu'antispasmodique. (Baba-Aissa, 1991).

2.2.3 *Mentha spicata* L. (Menthe verte)

2.2.3.1 Origine

La menthe verte (Figure 41) fait partie de genre « *Mentha* » appartenant à la famille des labiées ou lamiacées qui est l'une des plus importantes familles dans le monde végétal (Talahagcha et Kassa, 2008). La menthe verte est aussi appelée menthe romaine, baume vert ou encore menthe marocaine (Stecher et al., 1960). La menthe verte est connue en Afrique du Nord sous le nom de « Naânaâ ».

Au sein du Genre *Mentha*, on cite la menthe verte (*Mentha spicata*), la menthe poivrée (*Mentha x piperita*), la menthe pouliot ou menthe 'Flio' (*Mentha pulegium*), la menthe à feuilles rondes (*Mentha rotundifolia*)...etc.

La menthe est une plante vivace, vivace du verbe vivre, donc c'est une herbacée aromatique robuste qui vit longtemps en général plus de deux ans. Cette espèce est de 25 à 75 cm de long, à tiges rameuses quadrangulaires droites, glabres, de couleur pourpre. C'est une herbe à rhizomes traçants servant à la propagation de la plante. La feuille de la plante caractérisée par sa forme dentelée et pointue peut varier d'une espèce à une autre. Les fleurs sont généralement blanchâtres à mauve, et prennent une forme en boule ou en cône. Elles sont petites, opposées, groupées en épis terminaux étroits, allongés et aigus, fleurissant de juillet à octobre. Cette espèce se distingue de la menthe poivrée (*Mentha x piperita*) par sa couleur vert clair et son odeur moins pénétrante (Ait-Ouahoune, 2005; Dupont et Guignard, 2012; Grosjean, 1990).

L'origine de la menthe verte est inconnue mais il s'agit probablement d'un hybride issu de *M. longifolia* et de *M. suaveolens* ; elle est cultivée exclusivement aux USA, en Angleterre, en Hollande ainsi qu'en Afrique du nord (Algérie, Maroc...), (Teuscher et al., 2005).

La menthe verte pousse dans les lieux humides particulièrement dans les montagnes (Polese, 2006). Elle est retrouvée essentiellement sur les terrains riches et frais, ensoleillés à semi ombragés surtout (Douay, 2008). Elle est cultivée en général dans les jardins potagers ou en pots près des maisons (Walter et Lebot, 2003). Elle n'aime pas les sols calcaires et préfère les sols sableux meubles, humides et profonds, avec un pH entre 5,5 et 7 (Small et Deutsch, 2001).



Figure 41: *Mentha spicata* L. (la menthe verte)

(IBIN, 2018)

2.2.3.2 Localisation de l'HE de la menthe

L'appareil sécréteur des huiles essentielles des feuilles de *Mentha spicata* est externe, comme dans le cas de la plupart des Lamiacées. Il est localisé sur l'épiderme de la feuille. C'est des trichomes glandulaires capités spécialisés qui accumulent les huiles essentielles dans des compartiments de stockage intracellulaires et les rejettent à l'extérieur de la surface du végétal au niveau de la cavité subcuticulaire des cellules sécrétrices (Figure 42.a) (Taleb-Toudert, 2015).

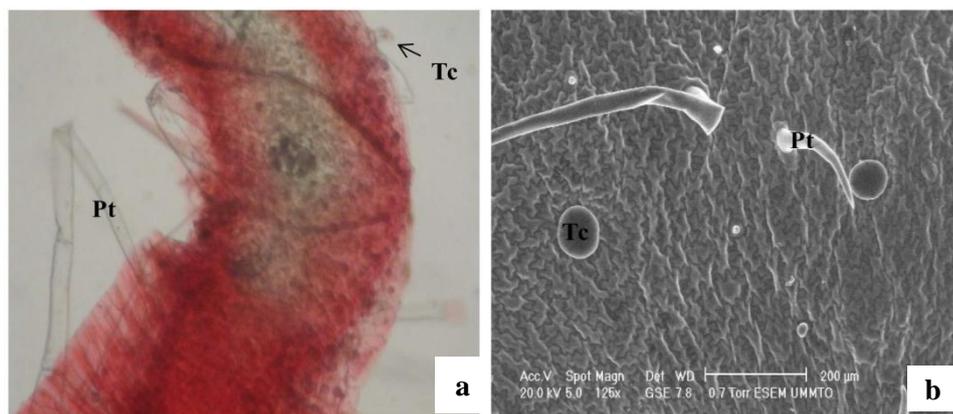


Figure 42: a) Coupe transversale de la feuille de *M.spicata* observée au microscope optique x 400 montrant des poils tecteurs (Pt) et des trichomes capités (Tc). b) Micrographie de la feuille de *M.spicata* montrant des poils tecteurs (Pt), et des trichomes capités (Tc) au MEB x 250

(Taleb-Toudert, 2015)

2.2.3.3 Propriétés physico-chimiques et organoleptiques

L'huile essentielle de *Mentha spicata* est décrite selon les normes comme un liquide mobile et limpide, presque incolore à jaune pâle, caractérisé par une odeur fraîche agréable. Les tableaux 5 et 6 rassemblent les propriétés organoleptiques et physicochimiques de l'HE de menthe verte obtenues par plusieurs auteurs.

Tableau 5: Propriétés organoleptiques de l'HE de *Mentha spicata*

Pays	Région	Partie de la plante	Apparence	Couleur	Odeur	Référence
-	-	-	Liquide mobile et limpide	Presque incolore à jaune verdâtre pâle	Fraîche avec odeur de la feuille	(ISO, 1988)
-	-	-	Liquide mobile et limpide	Presque incolore à jaune pâle	Fraîche, plus ou moins mentholée selon l'origine	(AFNOR, 2000)
Algérie	Laghouat	Feuilles, fleurs, tige	-	Jaune pâle	Aromatique épicée	(Bardaweel et al., 2018)
	Tizi-Ouzou	-	Liquide	Jaune clair	Très fine particulièrement agréable	(Taleb-Toudert, 2015)
	Tizi-Ouzou	Feuilles, fleurs, tige	Liquide mobile	Jaune clair	Fraîche avec odeur de la feuille	(Benazzouz et Hamdane, 2012)
	Ain Defla	-	Liquide	Jaune claire	Forte et mentholée	(Hadj-Ahmed et Kouider-Mahmoud, 2017)
	Annaba	-	Liquide très fluide	Incolore à jaune verdâtre pâle	Herbacée, fraîche, carvonée, puissante	(Khiari, 2018)
Ethiopie	-	Feuilles	Liquide clair	Vert jaunâtre pâle	Plaisante	(Mieso et Befu, 2020)

Tableau 6: Propriétés physico-chimiques de l'HE de *Mentha spicata*

Origine	Partie de la plante	Méthode d'extraction	Densité d ₂₀ ²⁰	Indice de réfraction n ₂₀	Pouvoir rotatoire	Indice d'acide	Référence
-	-	-	0,920 - 0,937	1,4850 - 1,4910	60° à 45°	-	(ISO, 1988)
Algérie	Feuilles, fleurs, tige	HD	0,8800	1,4800	-	1,3000	(Bardaweel et al., 2018)
Tunisie	Feuilles, fleurs, tige	HD	0,9600	-	-	-	(Snoussi et al., 2015)
Soudan	Feuilles	HD	0,8395	1,4572	-	0,0614	(Suliman et al., 2012)
Ethiopie	Feuilles	HD	0,9210	1,485 ± 0,002	-	-	(Mieso et Befa, 2020)

2.2.3.4 Usages

Considérée comme une herbe aromatique, la menthe est, depuis toujours, un moyen efficace de lutter contre les troubles digestifs. En effet, idéale en infusion, elle permet de soulager les problèmes gastriques et peut aider en cas d'indigestion. Stimulante et relaxante, elle peut aussi être employée pour faciliter le sommeil et conduire à un état de relaxation. De nos jours, elle est fréquemment utilisée en inhalation pour lutter contre les rhumes et la toux ou aussi en infusion pour favoriser la digestion (Addadi et Ferradji, 2014).

L'huile essentielle de menthe est utilisée à grande échelle dans l'industrie alimentaire pour la préparation des sucreries, des confiseries et des boissons telles que les sirops. Elle sert aussi à parfumer les produits d'hygiène buccale comme les dentifrices et les bains de bouche. Elle est aussi présente dans plusieurs produits cosmétiques, comme les rouges à lèvres, les crèmes, les shampoings, les lotions, les mousses à raser et les savons (Beloued, 2001; Aye kee et al., 2017; Teuscher et al., 2005).

2.2.4 *Pimpinella anisum* L. (Anis vert)

2.2.4.1 Origine

Pimpinella anisum (figure 43) tire son nom du mot latin « anisum » qui signifie une plante à odeur très agréable. Il est connu aussi sous différentes appellations : « Anis vert » en Français, « aniseed » en Anglais, « El-Yansoune » en Arabe et « Habat El-halawa » en Arabe locale.

L'anis (*Pimpinella anisum*) est l'une des plantes aromatiques annuelles les plus anciennes au monde, de la famille des Apiacées. Largement cultivée aux bordures de la Méditerranée (Turquie, Égypte, Syrie, Espagne, etc.) et qui peut atteindre de 50 cm à 80 cm de haut. (Torck et Trotine, 1980).

Cette plante présente une odeur aromatique particulière et une saveur sucrée, des tiges minces longues et dressées, des fleurs blanches petites sont regroupées en ombelles fleurissent en juillet et sont remplacées par des fruits de couleur gris verdâtre très parfumés, et des feuilles longuement pétiolées composées de trois folioles dentelées (Crund, 1983).

L'anis est originaire de l'est du bassin méditerranéen et d'Afrique du Nord, plus précisément du Moyen-Orient. Il pousse favorablement sur les sols légers et dans les pays à climat tempéré et préfère un terrain ensoleillé (Geneviève, 1990).



Figure 43: *Pimpinella anisum* L. (l'anis vert)
(Stone, 2004)

2.2.4.2 Propriétés physico-chimiques et organoleptiques

Les propriétés organoleptiques et physicochimiques constituent un moyen de vérification et de contrôle de la qualité de l'HE.

Les tableaux 7 et 8 représentent les propriétés organoleptiques ainsi que les paramètres physico-chimiques de l'HE de *Pimpinella anisum* d'études antérieures.

Tableau 7: Propriétés organoleptiques de l'HE de *Pimpinella anisum*

Origine	Aspect	Odeur	Couleur	Référence
-	Liquide limpide ou masse cristalline	Caractéristique, rappelant celle de l'Anéthol	Incolore à jaune pâle à l'état liquide	(AFNOR, 1976)
Algérie	Liquide	Forte, épicée	Jaune	(Saibi 2012)
Bangladesh	Liquide homogène et transparent, plus léger que l'eau	Epicée	Légèrement jaunâtre	(Shamsun et al, 2012)
Oman	Liquide homogène et transparent, plus léger que l'eau	Epicée	Légèrement jaunâtre	(Albu et al et al, 2014)

Tableau 8: Propriétés physico-chimiques de l'HE de *Pimpinella anisum*

Origine	Partie de la plante	Procédé	Indice de réfraction	Densité relative	Viscosité (Pa.s)	Pouvoir rotatoire	Indice d'ester	Indice d'acide	Référence
-	-	-	1.552-1.559 à 20°C	0.98-0.99 à 20°C	-	de -2° à +2° à 20 °C	-	-	(AFNOR, 1976)
Tunisie	Graine	SD	1,49 à 20°C	-	-	-	-	-	(Romdhane. et al, 2001)
Iraq		HD	1.5559±0.112 á 25°C	0.737 ±0.176 á 25°C	0.003595±0.00011	-	-	-	(Al-Hilphy et al, 2015)
		MAHD	1.5451±0.173 á 25°C	0.733 ±0.173 á 25°C	0.003495±0.00011	-	-	-	
Bangladesh	-	HD	1.559 à 30°C	0.824 à 30°C	-	1° à 26°C	44.2576	8.0909	(Shamsun et al, 2012)
			1.554 à 30°C	0.828 à 30°C	-		40.3072	10.2237	
Soudan	Fruit		1.55017 à 27°C	0.882 à 27°C	-	-	-	-	(Hassan et Elhassan, 2016)

SD : Entraînement à la vapeur HD : Hydrodistillation MAHD : Hydrodistillation assistée par micro-ondes

2.2.4.3 Usages

L'huile essentielle d'anis est connue pour ses nombreuses utilisations thérapeutiques, elle est largement utilisée pour soulager les douleurs musculaires, les maux de ventre, les crampes abdominales, la congestion nasale et pulmonaire, les palpitations ou les sentiments d'oppression, elle est aussi efficace pour calmer les maux de tête, pour lutter contre l'asthénie et la fatigue (physique et psychique), pour combattre le vertige, elle est préconisée dans la médication du syndrome du côlon irritableetc. (Cecchinie, 1976).

En parfumerie et cosmétique c'est l'un des ingrédients utilisés dans la fabrication de l'eau de Cologne, du savon, des préparations dentaires et bains de bouche (Chiej, 1982).

Pour ses propriétés antibactériennes, l'huile essentielle d'anis vert est parfois utilisée pour éloigner les insectes.

Dans le domaine alimentaire elle est utilisée dans la préparation culinaire et confiserie et pour aromatiser certaines boissons alcoolisées (Cretti, 1981).

2.3 Composition chimique et rendement

2.3.1 *Rosmarinus officinalis* L. (Romarin)

2.3.1.1 Composition chimique

La composition chimique des huiles essentielles peut varier selon plusieurs paramètres dont la localisation géographique. Les tableaux 9 et 10 donnent la composition chimique de l'huile essentielle de romarin provenant de différentes régions de l'Algérie et de divers pays du monde respectivement :

Tableau 9: Composition chimique de l'huile essentielle de romarin de différentes régions d'Algérie

		Algérie-Centre			Algérie-Est					Algérie-Ouest		
	Partie de la plante	-			Parties aériennes					-	-	Feuilles et fleurs
	Méthode d'extraction	HD			HD			SD	HD	HD		HD
	Durée d'extraction (h)	3	3	3	1			2	2	3	3	
	Région	ENSA (Alger)	Beni Yenni (Tizi-Ouzou)	Tablat (Médéa)	Youkous (Tébessa)	Draa Hammam (Tébessa)	Ammacha (Tébessa)	Bibans (Borj-Bou-Arréridj)	Cherchell	Mostaganem	Tlemcen	
No.	Référence	(Outaleb, 2016)			(Boutabia et al., 2016)			(Boutekedjiret et al., 2003)	(Outaleb, 2016)		(Bekkara et al., 2007)	
1	Tricyclène	0,1	0,1	0,2	-	-	-	-	-	0,3	0,3	-
2	3-Thujène (α -Thujène)	t	-	t	-	-	-	-	-	0,1	0,1	-
3	α -Pinène	51,8	24,7	21	-	3,39	3,41	5,2	0,4	12	12,4	12,6
4	Camphène	6,2	4,5	22	-	14,4	14,47	3	0,3	6,3	6,8	2,9
5	Verbenène	0,2	0,4	-	-	-	-	-	-	0,2	0,2	-
6	Sabinène	t	-	t	2,4	15,93	16,01	-	-	t	t	0,1
7	β -Pinène	2,3	0,2	6,6	-	-	1,47	5,7	0,3	1,9	2	1,3
8	β -Myrcène (Myrcène)	1,1	0,6	0,2	-	-	-	1,7	t	1	1,3	1,2
9	α -Phellandrène	0,1	0,1	0,1	-	-	-	-	-	0,2	0,2	-
10	(+)-2-Carène(S-2-Carène)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,1
11	δ -3-Carène	t	0,3	-	-	-	-	-	-	0,7	0,7	-
12	α -Terpinène	0,2	0,1	0,1	-	-	-	-	-	0,2	0,3	0,4
13	p-Cymène	1,1	3,8	0,2	-	1,58	1,59	2,2	t	0,9	0,9	2,4
14	Eucalyptol (1,8-Cinéole)	t	t	9,5	72,91	32,59	32,76	52,4	31,9	14,9	12,9	11,8
15	Limonène	4,5	14,3	-	-	-	-	-	-	t	t	4
16	γ -Terpinène	0,8	0,1	0,1	-	1,74	-	0,5	t	0,3	0,3	0,2
17	cis-Sabinène hydrate	t	-	t	-	-	-	0,3	0,4	0,1	0,1	-
18	trans-Sabinène hydrate	-	-	t	-	-	-	-	-	1,5	1,3	-
19	α -Fenchone	-	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	p-Cyményl	-	0,4	-	-	-	-	-	-	0,8	0,8	-
21	α -Terpinolène (Terpinolène)	0,3	0,2	0,1	0,5	1,19	1,19	0,2	t	-	-	0,4
22	Filifolone	-	0,7	-	-	-	-	-	-	0,8	0,9	-
23	Linalool	1,1	-	-	-	0,1	0,1	1,1	3,9	-	-	5,9
24	Chrysanténone	0,2	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	0,7
25	α -Campholène aldehyde	0,3	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-

26	Camphre	7,8	13,8	32	17,16	4,46	4,48	12,6	19,7	41,6	40,7	13,8
27	Exo-Méthyl camphélinol	-	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	Pinocarvone	0,3	1,6	t	-	-	-	-	-	1,2	0,3	-
29	Pinocamphone	-	0,3	-	-	6,17	6,2	-	-	-	-	0,5
30	Iso-Pinocamphone	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,6
31	Bornéol	-	-	0,3	4,18	9,68	9,73	3,4	12,1	4	6,4	10,1
32	Iso-Bornéol	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	4-Terpinéol	0,3	1,2	0,2	1,88	3,64	3,66	0,7	4	1,7	1,4	0,9
34	α -Terpinéol	0,2	2,2	0,2	0,96	3,31	3,32	2,1	12,8	1,5	1,6	1,6
35	Verbénone	4,1	6,3	-	-	1,02	1,02	-	-	-	-	5,9
36	Endo-Bornéol	1,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37	Carvéol	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
38	Carvone	0,1	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
39	Géranol	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	Thymol	-	0,2	-	-	-	-	T	-	-	-	-
41	Acétate de bornyl	1,3	0,6	0,3	0,01	0,3	0,31	1,1	3,1	0,4	0,5	1,5
42	α -Copaène	-	0,2	0,2	-	0,04	0,04	0,2	0,6	-	-	-
43	Carvacrol	t	1,3	-	-	-	-	T	-	-	-	-
44	Pipériténone	-	0,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
45	Eugénol	t	0,1	-	-	-	-	T	-	-	-	-
46	Méthyl eugénol	-	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
47	β -Caryophyllène	6,8	2,5	3,3	-	-	-	4,2	3	0,8	1	0,8
48	Géranyl acétone	t	0,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
49	α -Farnesène	-	0,2	-	-	-	-	0,1	t	-	-	-
50	β -Farnesène	0,1	0,2	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
51	Aromadendrène	-	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
52	α -Humulène	0,8	1,2	0,3	-	-	-	0,4	t	0,3	0,8	-
53	α -Curcumène	0,1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
54	γ -Muuroène	-	-	0,3	-	-	-	-	-	-	-	-
55	Ledène	-	-	t	-	-	-	-	-	-	-	-
56	Germacrène	-	-	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
57	α -Muuroène	-	-	0,1	-	-	-	0,2	t	-	-	-
58	β -Bisabolène	1,2	2	0,1	-	-	-	-	-	0,7	-	-
59	Germacrène D	-	-	-	-	-	-	0,3	t	-	-	-
40	γ -Cadinène	-	0,5	0,2	-	-	-	0,4	t	-	-	-

41	cis-Calaménène	-	0,3	t	-	-	-	-	-	-	-	-
42	δ-Cadinène	-	0,2	0,8	-	-	-	0,3	t	-	-	-
43	Calacorène	-	-	-	-	-	-	0,2	t	-	-	-
44	β-Sesquiphellandrène	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
45	α-Bisabolène	-	-	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
46	Oxide de Caryophyllène	0,3	-	0,1	-	-	-	-	-	0,2	0,4	0,8
47	Oxide de Caryophyllène I	-	-	-	-	-	-	0,1	t	-	-	-
48	Oxide de Caryophyllène II	-	-	-	-	-	-	0,1	t	-	-	-
49	Acide palmitique	-	-	-	-	-	-	0,1	-	-	-	-
50	Spathuléol	-	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
51	Méthyl jasmonate	-	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
52	Cadalène	-	0,1	-	-	-	-	-	t	-	-	-
53	α-Bisabolol	0,1	0,3	0,1	-	-	-	-	t	-	-	-
54	Trans-Pinocarvéol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,9
55	1-Dodecène	-	-	-	-	0,09	0,09	-	-	-	-	-
56	Myrténol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,7
57	Tétradecène	-	-	-	-	0,12	-	-	-	-	-	-
	Total composés identifiés	96,9	89,4	98,9	100	99,75	99,85	98,8	92,5	94,6	94,6	87,1
	Rendement en HE (%)	1,02	1,8	0,96	-	-	-	1,2	0,44	1,6	1,9	0,6

t : Traces

Tableau 10: Composition chimique de l'huile essentielle de romarin de différents pays

	Pays	Maroc	Tunisie	Egypte	Corse	France	Italie	Espagne	Yougoslavie	Grèce	Turquie
	Méthode d'extraction	HD	HD	-	-	-	-	-	-	-	HD
	Durée d'extraction (h)	3	3	-	-	-	-	-	-	-	5
No.	Référence	(Hannour et al., 2018)	(Hcini et al., 2013)	(Karawya et al., 1962)	(Corticchiato et Casanova, 1992; Tomi et al., 1995; Bradesi, 1995; Programme d'initiative, 1993)	(Lawrence, 1977; Schwenker et Kloehn, 1963; Lamparsky et al., 1982; Rhyu, 1979; Granger et al., 1973)	(Satta et al., 1997; Tuberoso et al., 1998; Moretti et al., 1998; Bazzoni et al., 1998; Pintore et al., 2002; Angioni et al., 2004; Usai et al., 2011; Ladu et al., 2015; Delitala et Soccolini, 1980)	(Barranco, 1980; Dragoco, 1979; Schwenker et Kloehn, 1963; Rhyu, 1979; Formacek et Kubeczka, 1982)	(Damjanic et Grzunov, 1976; Grzunov et Devetak, 1978)	(Skrubis, 1972)	(Binzet et al., 2020)
1	Tricyclène	-	0,11 - 0,18	-	-	0 - t	-	0 - 0,4	0 - t	-	0,2
2	3-Thujène (α-Thujène)	-	-	-	-	0 - t	0 - 2,6	0 - 0,6	0 - t	-	0,23
3	α-Pinène	1,85 - 9,19	8,58 - 9,32	13,7	9,6 - 41	10,4 - 17,2	14,7 - 47,1	21,6 - 26	22,4 - 26,5	10,3	8,11
4	α-Fenchène	-	0,14 - 0,16	-	-	-	-	-	-	-	-
5	Camphène	2,63 - 7,44	3,58 - 5,07	19,2	3,6 - 10,4	4 - 8	2,9 - 8,9	7,7 - 10	4,7 - 8,2	4	4,22
6	Verbenène	-	-	-	0 - 2,9	-	0 - 0,97	-	-	-	-
7	1-Octèn-3-Ol	-	0,2 - 0,31	-	-	-	-	-	-	-	-
8	Sabinène	1,51 - 1,56	-	6,4	-	0 - t	0 - 3,72	0 - 7,2	-	-	0,1
9	3-Octanone	0 - 0,83	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	β-Pinène	5,62 - 8,58	-	4	0,5 - 4,2	0,6 - 7,8	0 - 3,8	0 - 5,8	0 - 3,7	-	3,6
11	β-Myrcène (Myrcène)	-	1,06 - 1,13	10,2	0 - 4	1,2 - 4	0 - 4,7	1,1 - 5,1	t - 3,4	-	1,48
12	α-Phellandrène	0,14 - 0,23	0,21 - 0,27	-	0 - 1,3	0 - 0,1	0 - 5,8	0 - t	-	-	-
13	(+)-2-Carène (S-2-Carène)	0 - 0,68	-	-	-	-	-	-	0 - 2	-	0,07
14	δ-3-Carène	0 - 1,32	0,04 - 0,2	-	-	0 - t	0 - 1,47	0 - 0,1	0 - 1,3	-	-
15	(+)-4-Carène	0,67 - 0,98	-	-	-	-	-	-	0 - 0,1	-	-
16	α-Terpinène	0 - 0,79	0,62 - 0,86	-	-	0 - 0,7	0 - 1,2	-	-	-	-
17	o-Cymène	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,04
18	p-Cymène	0 - 2,44	2,42 - 3,11	2,3	0,7 - 4,1	1,8 - 3,4	0 - 4,34	1,1 - 3,9	0 - 1,9	-	-
19	Eucalyptol (1,8-Cinéole)	17 - 46,23	33,08 - 37,75	19,2	0 - 18,3	18,5 - 49,2	0,8 - 17,6	19,5 - 30	0,3 - 39,2	51,2	33,15
20	β-Phellandrène	-	-	4,5	-	-	0 - 3,9	-	-	-	-
21	Limonène	-	2,99 - 3,19	-	1,8 - 9,8	2 - 3,4	2 - 5,6	-	1,8 - 2,8	0,4	-
22	α-Ocimène	-	-	-	-	-	-	-	0 - 28,3	-	-

23	β-Ocimène	-	-	-	-	0 - t	-	0 - 1,3	-	-	-
24	γ-Terpinène	0 - 1,41	0,46 - 0,79	-	0 - 1,9	0 - 1,1	0 - 1,92	0 - 0,7	0,7 - 2,2	-	0,69
25	Aldehyde fencholénique	-	-	-	-	-	-	-	0 - 0,6	-	-
26	α-Terpinolène (Terpinolène)	-	0,22 - 0,39	-	-	0 - 0,1	0 - 1,4	0 - 0,6	-	-	0,27
27	Styrène	-	0,09 - 0,13	-	-	-	-	-	-	-	-
28	Linalool	0,39 - 1,54	0,89 - 1,14	1	0,6 - 4,5	0 - 17,3	0,8 - 2,4	0,5 - 14,1	t - 0,3	0,4	0,75
29	Alcool fenchylique	-	0,15 - 0,18	-	-	-	-	-	-	-	-
30	Camphre	17,29 - 21,33	13,55 - 18,13	3,2	0,6 - 14,9	0,1 - 25	1,5 - 14,1	0,1 - 21,6	0 - 12,3	5,5	10,31
31	Pinocarvone	-	-	-	-	-	-	-	0 - 11,6	-	-
32	Pinocamphone	-	-	-	-	-	0 - 1,01	-	-	-	-
33	Iso-Pinocamphone	0 - 0,28	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	Bornéol	4,75 - 6,84	4,08 - 8,17	5,4	3,1 - 14,1	0 - 6,3	2,5 - 18,1	0 - 3,1	0 - 12,8	4,7	7,16
35	Iso-Bornéol	-	0,89 - 1,18	-	-	-	-	-	-	-	-
36	4-Terpinéol	2,19 - 2,8	1,23 - 1,43	-	0 - 2,4	0 - 1,3	0 - 5,2	0 - 2,1	-	-	1,95
37	α-Terpinéol	1,85 - 5,31	5,48 - 6,98	-	0 - 2,5	0 - 5,8	0 - 2,9	0 - 1,8	0 - 4,5	-	4,92
38	δ-Terpinéol	-	-	-	-	0 - 1,6	-	-	-	-	-
39	p-Cymèn-8-ol	-	0,11 - 0,14	-	-	-	-	-	0 - 0,1	-	-
40	E-Pinocarvéol	-	0,06 - 0,1	-	0 - 1,3	-	-	-	0 - 2,3	-	-
41	Verbéol	-	-	-	-	-	0 - 3,03	-	0 - 2,1	-	-
42	Verbénone	-	-	-	2,7 - 17,7	0 - 5,5	0 - 24,1	0 - 1,5	-	-	-
43	Carvone	-	-	-	-	0 - 0,4	-	-	-	-	-
44	Thuyone	-	-	-	-	0 - 0,3	-	0 - 0,1	-	-	-
45	Géraniol	-	-	0,1	0 - 6,6	-	0 - 2,5	-	-	-	0,08
46	Thymol	-	0,12 - 0,18	-	-	-	-	-	-	-	0,18
47	Acétate de thymol	-	0,04 - 0,12	-	-	-	-	-	-	-	-
48	Acétate de bornyl	1,97 - 4,76	0,5 - 0,87	2	5 - 21,9	0 - 1,3	3,2 - 14,9	0 - 3,6	0 - 7,3	-	5,66
49	Acétate de linalyl	-	-	1,4	-	-	-	-	0 - 0,2	-	-
50	Acétate de fenchyl	-	-	-	-	-	-	-	0 - 0,1	-	-
51	α-Copaène	0 - 0,24	-	-	-	0 - 0,6	-	-	0 - 2,4	-	-
52	Carvacrol	-	0,16 - 0,79	-	-	-	-	-	-	-	0,13
53	α-Cubébène	-	0,09 - 0,2	-	-	-	-	-	-	-	-
54	Eugénol	-	0,21 - 0,29	-	-	-	-	-	-	-	-
55	Méthyl eugénol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,49
56	β-Caryophyllène	2,3 - 6,43	0,2 - 0,26	-	-	1,7 - 4,9	0 - 4,9	0 - 1,8	-	-	0,12
57	α-Farnesène	-	-	-	-	-	-	-	0 - 3,4	-	-
58	α-Humulène	0,53 - 0,64	0,21 - 0,36	-	-	0 - 1	-	0 - t	-	-	-
59	γ-Muuroène	-	0,11 - 0,24	-	-	0 - 3,1	-	-	0 - 0,5	-	0,25

60	α -Murolène	0 - 0,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
61	β -Cadinène	0 - 0,26	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62	β -Bisabolène	0 - 0,39	-	-	-	0 - 0,04	-	0 - 0,1	-	-	0,09
63	Germacrène D	0 - 0,24	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64	γ -Cadinène	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,24
65	trans-Calaménène	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,11
66	δ -Cadinène	-	0,22 - 0,54	-	-	-	-	-	-	-	0,41
67	Oxide de Caryophyllène	0,92 - 4,34	-	-	-	-	-	-	-	-	2,04
68	Méthyl jasmonate	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,15
69	Cadalène	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,07
70	α -Bisabolol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1
71	Myrténol	0 - 0,38	-	-	0 - 1,9	-	-	-	-	-	-
72	Iso-Caryophyllène	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,02
73	α -Caryophyllène	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,23
74	1,2-Epoxide-humulène	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,3
75	Alloaromadendrène	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,22
76	Caryophylla-4(12),8(13)-dièn-5 α -ol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,32
77	Iso-Aromadendrène époxide	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,8
78	Longibornéol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,09
79	Oxide de β -Caryophyllène	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,2
80	Alcool de Germacrène B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,09
81	α -Springène	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,06
82	Epi-Cryptomériol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,08
83	Isopimara-9(11),15-diène	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,14
84	1S4R6R-g-Himachalen-4-yl acétate	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,08
85	1-Octen-3-ol 3-Octanone	0 - 0,17	-	-	-	-	-	-	-	-	-
86	3-Allylcyclohexène	0 - 0,46	-	-	-	-	-	-	-	-	-
87	Citronellol	-	0,02 - 0,06	-	-	-	-	-	-	-	-
88	Eugénol méthyl-éther	-	0,16 - 0,47	-	-	-	-	-	-	-	-
89	Autres	-	-	-	-	0 - 0,06	-	-	-	-	-

t : Traces

L'observation des données des tableaux précédents nous indique que la composition chimique de l'huile essentielle de romarin varie d'une région à une autre d'Algérie et d'un pays à un autre. Cependant toutes ces huiles possèdent quelques constituants en grande proportion appelés constituants majoritaires dont on peut citer : le α -pinène, 1,8-cinéol, camphre, verbénone, bornéol, camphène, α -ocymène, linalool, acétate de bornyl, α -terpinéol, sabinène, ...etc.

Selon Granger et coll. (Granger et al., 1973), il existe 3 types (chémotypes) d'huile essentielle de romarin en fonction de ses constituants majoritaires :

- Type à 1,8-cinéole. Régions : Italie, Maroc et Tunisie.
- Type à camphre et bornéol. Régions : Espagne.
- Type à α -pinène et verbénone. Régions : Algérie et Corse.

Le tableau 11 comporte la composition chimique des différents chémotypes de romarin :

Tableau 11: Composition chimique des différents chémotypes de l'huile essentielle de romarin (Leplat, 2017)

Composés	CT camphre et bornéol (%)	CT 1,8 cinéole (%)	CT α -pinène et verbénone (%)
1,8 cinéole	16-25	38-55	9,53
Camphre	13-21	5-15	7,17
Alpha-pinène	18-26	9-14	27,3
Bornéol	2,0-4,5	1,5-5,0	4,96
Acétate de bornyle	0,5-2,5	0,1-1,5	12,52
Verbénone	0,7-2,5	<0,4	7,06
p-cymène	1,0-2,2	0,8-2,5	1,52
Myrcène	1,5-5	1-2	2,29
Camphène	8-12	2,5-6	7,91
Limonène	2,5-5	1,5-4	3,96
Beta-pinène	2-6	4-9	2,53
Alpha-terpinéol	1,0-3,5	1,0-2,6	1,40
Beta-caryophyllène			traces
Alpha-terpinène			0,56
Linalol			2,23
Terpinolène			1,03

2.3.1.2 Paramètres influençant la composition et le rendement

Plusieurs paramètres peuvent avoir un effet sur le rendement et la composition de l'huile essentielle comme : le climat, les conditions de culture, la génétique, le temps de récolte, les parties de la plante utilisées, le procédé d'extraction utilisé, les conditions opératoires (durée, masse, débit,... etc.).

Le Tableau 12 donne les différentes valeurs de rendement en huile essentielle de romarin trouvées par plusieurs auteurs :

Tableau 12: Variation du rendement en HE de romarin en fonction de plusieurs paramètres

Région	Méthode d'extraction	Durée d'extraction (h)	Partie de la plante	Masse de végétal (g)	Débit de vapeur (ml/min)	Nb de plateaux	Rendement en HE %	Référence
Bibans (Borj-Bou-Arréridj)	HD	2	Parties aériennes	50	4,5	-	0,44	(Boutekedjiret et al., 2003)
ENSA (Alger)		3	-	100	-	-	1,02	(Outaleb, 2016)
Beni Yenni (Tizi-Ouzou)			-	100	-	-	1,80	
Tablat (Médéa)			-	100	-	-	0,96	
Cherchell			-	100	-	-	1,60	
Mostaganem			-	100	-	-	1,90	
Telemcen		-	Feuilles et fleurs	-	-	-	0,60	(Bekkara et al., 2007)
Bibans (Borj-Bou-Arréridj)	SD	2	Parties aériennes	50	4,5	1	1,20	(Boutekedjiret, 1999)
				100	10	1	1,54	
				300	10	1	1,63	
				100	30	1	0,42	
				300	30	1	1,07	
				100	10	3	1,25	
				300	10	3	1,56	
				100	30	3	1,49	
				300	30	3	1,10	
				200	20	2	1,12	

La comparaison de ces valeurs nous permet de déduire que le rendement en huile essentielle de romarin est compris entre 0,4% et 1,9%. La valeur minimale étant obtenue par Boutekedjiret et coll. (Boutekedjiret et al., 2003) pendant 2 heures avec un débit de 4.5 ml/min et une masse de 50 g, et la valeur maximale par Outaleb (Outaleb, 2016) pendant 3 heures et une masse de 100g et ceci dans le cas de l'hydrodistillation. Alors que pour l'entraînement à la vapeur d'eau la plus grande valeur à été obtenue dans le cas de l'utilisation d'une masse de 300g avec un débit de 10 ml/min alors que la plus faible valeur à été trouvée dans le cas d'une masse de 100g et un débit de 30 ml/min.

Boutekedjiret (Boutekedjiret, 1999) a effectué des expériences pour déterminer l'influence de divers paramètres sur le rendement et la composition de l'huile essentielle obtenue par entraînement à la vapeur d'eau. Ces paramètres ont été classés en paramètres intrinsèques (propres au matériel végétal) et paramètres opératoires (modifiables selon l'expérience).

2.3.1.2.1 Paramètres intrinsèques

- Période de récolte

Le temps de récolte influe énormément sur le rendement et la composition. Du point de vue quantitatif, le rendement est optimal pendant la floraison, alors que du point de vue qualitatif, la teneur en composés majoritaires est différente d'une période à une autre :

- La teneur en **1,8-cinéole** est importante en plain boutonisation et début de floraison puis diminue ;
- Le pourcentage de **camphre** est maximal en plain boutonsation et devient minimum en début de floraison puis se stabilise à 11% ;
- La teneur en monoterpènes est maximale en plain floraison ;
- La proportion des alcools, esters et sesquiterpènes est la plus élevée après floraison.

- Durée et mode de stockage

D'après les résultats de l'étude de Boutekedjiret, le rendement est optimal après **2 semaines** de stockage, ceci est dû peut être à la production de l'huile essentielle même après récolte. D'un autre côté, la teneur en monoterpènes (composés volatils) diminue régulièrement alors que celle des sesquiterpènes (composés lourds) augmente à cause de l'évaporation des monoterpènes.

Le stockage de la plante à l'air libre permet de la conserver pendant une longue période de temps (plusieurs mois) contrairement au stockage dans des bocaux hermétiques qui n'a duré que 10 jours avant que la plante ne commence à pourrir.

Le stockage de la matière végétale dans des sacs en plastique permet d'obtenir un rendement en huile essentielle plus élevé que celui de la plante stockée dans des sacs en jute. Ceci est probablement dû au fait que l'huile superficielle et l'humidité s'évaporent plus lentement dans des sacs en plastique.

La plante fraîche à pu être conservée pendant deux jours dans des bocaux teintés contre dix jours dans des bocaux transparents, Donc la lumière joue un rôle important dans le métabolisme des végétaux en maintenant une certaine activité cellulaire qui permet à la plante de rester en vie pendant un certain temps (Boutekedjiret, 1999).

- Nature et état de la matière végétale

L'utilisation des feuilles de la plante uniquement dans l'extraction permet d'obtenir des rendements plus élevés en huile essentielle.

2.3.1.2.2 Paramètres opératoires

- Durée

La durée d'extraction est l'un des facteurs influençant le rendement et la qualité de l'huile essentielle. On trouve dans la littérature, que la durée d'extraction par entraînement à la vapeur d'eau varie entre 1,5 et 4 heures. Cependant une durée de 1,5 h est suffisante pour extraire une grande partie de l'huile essentielle par entraînement à la vapeur.

- Masse

L'augmentation de la masse du végétal à traiter induit l'augmentation du rendement de l'huile essentielle obtenue.

- Débit

Le débit de distillat influe sur le rendement. Si celui-ci est très faible, il ne sera pas suffisant pour extraire et entraîner l'huile essentielle à partir de la matière végétale. Si le débit augmente énormément il provoquera la création de chemins préférentiels pour le passage de la vapeur d'eau à travers le lit de matière végétale ce qui diminuera le contact entre la phase solide et fluide réduisant ainsi le transfert de matière et donc le rendement. Boutekedjiret a trouvé une valeur optimale de débit de 20 ml/min (Boutekedjiret, 1999).

2.3.2 *Pistacia lentiscus* L. (Pistachier)

2.3.2.1 Composition chimique

Les tableaux 13, 14 et 15 montrent la composition chimique de l'huile essentielle de pistachier, à partir d'études antérieures, de différentes parties de la plante obtenue par analyse chimique par chromatographie en phase gazeuse (CG) couplée avec spectrométrie de masse (CG-MS).

Les principaux composés de *Pistacia lentiscus* d'après les 2 tableaux (Algérie et différentes origines) sont : Myrcène, α -pinène, Germacrène D, limonène, β -pinène, β -Caryophyllène, α -Phellandrène, sabinène, terpinén-4-ol, α -terpinéol

2.3.2.2 Paramètres influençant la composition et le rendement

2.3.2.2.1 Paramètres intrinsèques

- Période de cueillette

Une étude sur l'influence de la période de récolte (de janvier à décembre) sur le rendement en huile essentielle extraite par un procédé d'hydrodistillation des feuilles de pistachier marocain (de la région de Taounate) a été faite par (Haloui et al, 2015). Cette étude a montré que le rendement en huiles essentielles augmentait significativement avec la récolte, ainsi, les rendements les plus élevés ont été obtenus en mai ce qui correspond au stade de floraison du lentisque de la région de Taounate.

Tableau 13 : Composition chimique de l'huile essentielle de pistachier d'Algérie

Origine	Alger						Blida		Bejaia	Bouira		Jijel	Tipaza					
	Forêt de Bainem			Alger	Bouchaoui		Chrèa						Gouraya					
Procédé	HD																	
Matière Végétale	Feuilles	Parties aériennes séchées	Fruits secs	Parties aériennes sèches	Fruits secs	Parties aériennes sèches	Parties aériennes séchées	Fruits secs	Parties aériennes séchées	Parties aériennes séchées	Feuilles sèches	Parties aériennes sèches	Parties aériennes sèches			Fruits secs		
Référence	(Benyoussef et al., 2005)	(Mecherara-Idjeri et al., 2011)		(Dob et al., 2011)	(Mecherara-Idjeri et al., 2011)	(Mecherara-Idjeri et al., 2011)	(Mecherara-Idjeri et al., 2011)	(Mecherara-Idjeri et al., 2011)	(Mecherara-Idjeri et al., 2011)	(Mecherara-Idjeri et al., 2011)	(Medjkane, 2016)	(Mecherara-Idjeri et al., 2011)	(Mecherara-Idjeri et al., 2011)			(Mecherara-Idjeri et al., 2011)		
Composé																		
tricyclene	-	0.4	0.1	0.2	0.1	0.5	0.6	0.3	0.2	0.3	1.4	0.73	0.1	0.2	1.8	2	1.7	0.4
α -thujene	-	tr	tr	tr	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.11	tr	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1
α -pinene	-	18.5	9.4	3.6	19.5	27.2	32.1	17.9	16.5	3.9	20.0	15.47	3.5	2.9	25.8	27.3	51.5	9.4
camphene	-	2.2	0.6	tr	0.5	1.9	2.4	1.3	0.9	1.9	5.7	2.94	0.6	0.7	6.8	7.1	5.8	1.5
sabinene	0.3	0.2	0.1	0.4	0.3	5.6	3.1	1.9	2.0	7.1	2.9	-	1.3	3.6	5.5	11.5	11.6	1.4
β -pinene	0.6	7.6	3.5	3.7	2.8	6.7	10.1	8.9	6.6	2.3	4.2	7.31	1.4	0.8	21.8	5.0	4.4	6.8
Myrcene	0.2	2.8	28.0	-	62.8	2.7	3.1	33.1	45.4	0.8	3.6		8.4	11.6	4.9	0.9	0.9	69.7
α -phellandrene	0.8	5.0	tr	0.4	1.3	1.8	5.5	2.3	2.2	0.1	14.1	3.2	0.7	tr	0.4	0.5	0.4	0.1
δ -3-carene	-	0.1	tr	0.4	0.1	0.1	0.1	tr	0.2	tr	0.1	0.08	0.1	tr	Tr	0.1	tr	0.1
α -terpinene	-	0.2	tr	-	0.2	2.3	2.0	0.7	0.3	tr	1.0	2.81	0.2	-	1.1	2.5	0.8	0.2
p-cymene	-	3.1	3.7	0.4	0.8	2.8	1.0	0.6	0.3	7.7	1.0	-	1.3	4.2	0.3	0.2	0.2	0.3
limonene	3.5	29.0	24.1	3.0	2.6	9.4	4.7	2.3	1.9	9.8	5.3	14.7	2.8	25.5	2.1	2.2	2.0	0.8
β -phellandrene	-	3.0	0.4	-	1.2	2.5	4.0	2.4	1.9	0.3	4.4	-	-	tr	2.3	1.7	1.1	1.0
benzyl alcohol	-	-	-	0.3	-	-	-	-	-	-	--	-	-	-	-	-	-	-
(Z)- β -ocimene	-	0.1	tr	-	0.3	0.1	tr	0.2	2.0	-	0.2	0.23	tr	-	0.1	tr	tr	0.5

(E)- β -ocimene	-	1.2	0.4	0.3	0.8	0.5	0.4	0.8	6.0	-	0.8	0.9	0.1	-	0.4	0.7	0.5	1.0
2-nonanone	1.4	0.1	0.5	1.7	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.31	0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2
terpinolene	-	0.5	0.1	0.4	0.3	1.5	1.2	0.5	0.3	0.1	0.7	-	0.2	tr	0.8	1.6	0.7	0.2
isoamyl 2-methylbutyrate	-	0.2	0.2	-	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	-	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1
isoamyl isovalerate	-	1.3	0.8	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.19	-	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1
α -fenchol	-	0.1	-	0.1	-	0.1	0.1	0.1	-	0.2	0.1	0.1	-	tr	0.1	tr	-	-
<i>cis</i> -p-menth-2-en-1-ol	-	0.1	0.2	1.4	tr	0.1	0.1	0.1	tr	0.2	0.1	0.08	-	tr	0.1	0.1	0.1	tr
<i>trans</i> -p-menth-2-en-1-ol	-	0.2	0.3	-	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.5	0.1	-	-	tr	0.2	0.1	0.1	0.1
camphene hydrate	-	Tr	0.1	--	tr	tr	0.1	tr	tr	0.2	0.1	--	-	-	0.1	0.1	0.1	tr
borneol	0.8	0.1	0.1	0.7	tr	0.1	0.1	tr	tr	0.2	0.1	0.09	-	tr	0.1	0.1	0.1	tr
terpinen-4-ol	17.3	0.4	0.3	3.4	0.3	5.3	4.8	1.8	0.5	6.3	1.7	-	0.2	0.5	2.8	7.0	2.5	0.8
α -terpineol	10.4	1.0	0.7	1.4	0.4	1.3	1.6	0.9	0.3	1.5	1.1	1.8	0.4	0.1	1.7	0.9	0.7	0.6
myrtenol		0.1	0.2	-	tr	0.1	tr	tr	tr	0.2	0.1	-	-	tr	0.1	0.1	tr	tr
isoamyl hexanoate	0.2	0.3	0.3	-	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.8	0.2	-	-	0.1	0.1	0.2	-	0.1
bornyl acetate	-	0.8	0.6	0.3	0.2	0.5	1.2	0.6	0.5	1.3	3.9	1.63	0.3	0.1	3.9	4.1	3.3	0.9
2-Undecanone	1.4	0.2	0.4	-	0.1	0.5	0.6	0.4	0.2	1.2	0.5	0.93	0.9	0.8	0.5	0.6	0.3	0.1
α -terpinyl acetate	-	-	-	-	-	-	0.1	tr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
δ -elemene	1.2	-	-	0.4	-	tr	tr	tr	-	tr	tr	-	-	tr	tr	tr	-	-
α -Cubebene	-	tr	0.4	-	tr	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	0.07	0.2	0.1	Tr	tr	0.1	-
α -copaene	-	0.2	0.2	--	0.1	0.2	0.3	0.4	0.2	0.7	0.4		1.0	0.3	0.1	0.4	0.3	tr
β -Elemene	1	0.4	0.6	-	0.1	0.3	0.5	0.6	0.3	0.6	0.9	0.43	0.8	3.5	0.2	0.6	0.4	0.1
Benzyl isovalerate	-	0.5	0.5	-	tr	0.2	0.2	0.1	tr	0.4	-	0.05	-	-	0.2	tr	tr	tr
isocaryophyllene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	-	-	0.1	-	-	-	-

β -Caryophyllene	5	2.6	0.4	-	0.5	2.4	2.5	1.9	0.7	0.7	2.1	5.03	13.1	5.1	5.3	5.4	1.5	0.9
β -gurjunene	--	0.3	0.1	-	tr	0.2	0.1	0.1	0.1	0.7	0.2	-	0.7	0.2	0.1	0.2	0.1	tr
isoamyl benzoate	-	0.1	0.1		tr	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	-	Tr	0.1	0.1	0.1	0.1	tr
α -humulene	1.6	0.6	0.7	2.0	0.1	0.5	0.5	0.8	0.4	0.4	0.8	1.21	3.4	0.9	0.5	0.8	0.3	0.1
allo-aromadendrene	-	0.2	0.4	0.5	0.1	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.3	0.11	0.8	0.6	0.1	0.2	0.1	tr
γ -muurolene	-	0.5	0.4	4.2	0.2	0.6	0.5	0.7	0.5	1.5	0.2	-	3.4	0.4	0.1	0.6	0.4	tr
γ -gurjunene	-	Tr	-			0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.8	-	1.6	0.1	0.1	0.1	0.1	tr
germacrene D	15.8	2.5	tr	0.5	0.2	2.2	2.8	6.2	2.9	-	5.3	2.13	10.2	1.2	1.4	3.6	1.5	0.3
Epi-bicyclosesquiphellandrene	-	0.1	-	-	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-	0.5	0.3	tr	tr	tr	tr
Bycyclogermacrene	-	0.1	0.1	-	0.1	0.2	0.2	0.3	0.2	0.4	0.3	-	0.9	0.5	tr	0.2	0.2	tr
α -muurolene	0.9	0.7	0.5	2.9	0.2	0.5	0.6	0.7	0.4	0.8	1.0	0.83	1.9	0.5	0.2	0.6	0.4	0.1
β -bisabolene	-	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	-	0.2	-	0.2	0.2	0.2	tr	tr	tr
γ -cadinene	0.1	0.2	0.3	6.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.9	0.5	-	0.6	0.3	0.1	0.2	0.3	tr
δ -cadinene	2.8	0.8	0.1	0.7	0.5	1.0	1.6	1.6	1.1	0.3	2.0	3.82	5.4	0.3	0.6	1.4	1.0	0.2
Cubebol	-	Tr	-	-	tr	0.1	0.1	0.1	tr	-	0.2	-	0.4	-	tr	0.1	0.1	-
cubenene	-	Tr	-	-	-	0.1	0.1	0.1	-	-	0.1	-	0.5	-	0.1	0.1	-	-
α -cadinene	-	0.1	0.2	-	tr	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.16	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	tr
Elemol	0.3	0.3	0.2	-	-	0.3	tr	-	tr	1.2	tr	0.17	0.2	0.4	tr	-	0.1	tr
germacrene D 4-ol	-	0.2	0.1	-	tr	0.3	0.1	tr	0.1	0.6	0.1	-	-	-	tr	0.1	0.1	0.1
spathulenol	-	0.2	0.3	0.8	tr	0.2	tr	0.1	tr	1.3	0.1	-	0.7	5.8	0.1	tr	tr	-
caryophyllene oxide	0.3	0.7	1.1	1.3	0.1	1.2	0.2	0.1	0.1	7.0	0.1	1.01	1.5	3.2	0.3	0.1	0.1	0.1
viridiflorol	-	Tr	-	--	--	0.2	0.1	Tr	-	0.2	0.1	-	-	1.4	tr	tr	-	-
humulene epoxide II	-	0.2	0.4	0.2	tr	0.2	tr	0.1	tr	1.4	0.1	-	0.4	0.6	tr	tr	tr	tr

1-epi-cubenol	-	0.2	0.2	-	tr	0.5	0.4	0.4	0.1	0.9	0.7	-	1.8	0.8	0.1	0.2	0.1	tr
γ -eudesmol	0.5	0.1	0.1	-	-	0.3	0.1	0.1	tr	0.4	0.2	-	0.3	0.1	tr	0.3	0.1	tr
T-muurolol	3.7	1.1	0.8	3.8	0.1	1.1	1.2	1.0	0.3	2.5	1.7	0.71	2.1	1.0	0.5	0.5	0.3	0.1
α -muurolol	1.2	0.2	0.2	0.5	tr	0.3	0.3	0.3	0.1	0.8	0.5	-	1.5	0.2	0.1	0.2	0.1	-
t-cadinol	-	0.1	0.2	-	tr	0.2	0.2	0.3	0.1	0.4	0.4	-	2.7	0.2	0.1	0.2	0.1	tr
α -cadinol	3.3	1.2		0.2	-	1.6	1.5	1.4		3.1	2.3	1.68	3.6	1.9	0.7	0.7		-
α -bisabolol	-	0.2	0.1	-	tr	0.2	0.1	0.3	0.1	0.2	0.5	-	1.0	0.1	0.2	tr	tr	tr
epi-a-bisabolol	-	0.1		-	-	0.1	0.1	0.1		0.1	0.2	-	0.2	Tr	0.1	tr	-	-
Benzyl Benzoate	0.4	0.2	0.1	-	-	0.1	tr	tr	tr	0.7	tr	0.06	0.2	0.5	0.1	tr	tr	-
cuminaldehyde	-	-	0.2	-	tr	--	-	-	0.1	-	-	-	-	-	-	--	0.2	tr
α -terpinen-7-al	-	-	-	0.2	-	--	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
globulol	-	-	-	0.5	--	--	-	--	-	-	-	-	-	-	-	-	-	--
(Z)-3-hexenyl benzoate	-	--	-	0.2	-	-	-	-	-	-	-	0.19	-	-	-	-	-	-
β -oplopenone	-	-	-	2.6	-	-	-	-	-	-	-	--	-	-	-	-	-	-
α -acorenol	-	-	-	4.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
cis-carveol	-	-	0.2	tr	-	-	-	--	-	-	-	-	-	-	--	-	tr	-
β -bisabolol	-	-	-	0.2	-	-	-	-	--	-	-	-	-	-	-	-	-	-
elemicin	--	-	--	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
β -Myrcene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.93	--	-	-	-	-	-
trans-Ocimene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.11	-	-	-	-	-	-
γ -Terpinene	0.4	0.4	-	-	0.3	4.2	3.1	1.1	0.5	0.1	1.5	4.49	0.4	tr	1.7	3.8	1.3	0.3
α -Terpinene	-	-	-	--	-	-	-	-	-	-	-	2.81	-	-	-	-	-	-
1-Methyladamantane	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.09	-	-	-	-	-	-

4-Terpineol	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	2.99	-	-	-	-	-	-
Vitispirane	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.26	-	-	-	-	-	-
Isoamyl caproate	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.33	-	-	-	-	-	-
<i>trans</i> -carveol	--	--	0.5	-	--	--	--	--	--	--	--	-	-	-	-	-	tr	-
γ -Pyronene	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.05	-	-	-	-	-	-
α -campholenal	--	--	--	0.7	--	--	--	--	--	--	--	--	-	-	-	-	-	-
2-Undecanol	0.2	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-	-	-	-	-	-
Ylangene	-	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.13	-	-	-	-	-	-
α -Copaene	-	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.76	-	-	-	-	-	-
β -bourbonene	-	--	--	0.5	--	--	--	--	--	--	--	tr	-	-	-	-	-	-
α -ylangene	-	--	--	0.8	--	--	--	--	--	--	--	--	-	-	-	-	-	-
longifolene	-	--	--	12.8	--	--	--	--	--	--	--	--	-	-	-	-	-	-
Aromadendrene	-	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.28	-	-	-	-	-	-
α -Amorphene	-	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	1.44	-	-	-	-	-	-
Geranyl acetone	-	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.12	-	-	-	-	-	-
Valencene	-	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.15	-	-	-	-	-	-
(E,E)- α -Farnesene	-	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.78	-	-	-	-	-	-
Cadina-1,4-diene	-	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.19	-	-	-	-	-	-
α -Calacorene	-	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.13	-	-	-	-	-	-
<i>cis</i> -muurola-4 (14),5-diene	-	--	--	2.6	--	--	--	--	--	--	--	--	-	-	-	-	-	-
Germacrene B	0.7	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.1	-	-	-	-	-	-

β -Eudesmol	-	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.73	-	-	-	-	-	-
Hexahydrofarnesyl acetone	-	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.37	-	-	-	-	-	-
α - Terpinolene	-	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	2.4	-	-	-	-	-	-
1,8-cineol	0.2	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-	-	-	-	-	-
Amyl-Benzoate	0.6	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-	-	-	-	-	-
epiglobulol	0.2	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-	-	-	-	-	-
Cubanol	1.1	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-	-	-	-	-	-
Pentadecanoique acide	1.1	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-	-	-	-	-	-
tetradecanoic acid	1.1	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-	-	-	-	-	-
oleic acid	1.6	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-	-	-	-	-	-
E--piperitol	0.3	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-	-	-	-	-	-
α -copaene	0.5	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-	-	-	-	-	-
amyl benzoate	0.6	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-	-	-	-	-	-
β -citronellene	-	--	--	0.5	--	--	--	--	--	--	--	--	-	-	-	-	-	-
1-octen-3-ol	-	--	--	1.8	--	--	--	--	--	--	--	--	-	-	-	-	-	-
amyl isobutyrate	0.7	--	--	t	--	--	--	--	--	--	--	--	-	-	-	-	-	-
p-mentha-3,8-diene	-	--	--	0.2	--	--	--	--	--	--	--	0.14	-	-	-	-	-	-
linalool	-	--	--	0.2	--	--	--	--	--	--	--	0.16	-	-	-	-	-	-
2-nonanol	1.1	--	--	0.4	--	--	--	--	--	--	--	--	-	-	-	-	-	-
<i>trans</i> -b-terpineol	-	--	--	5.0	--	--	--	--	--	--	--	--	-	-	-	-	-	-
(E)-tagetone	-	--	--	0.2	--	--	--	--	--	--	--	--	-	-	-	-	-	-
daucene	-	--	--	0.1	--	--	--	--	--	--	--	--	-	-	-	-	-	-

carvone	-	--	--	0.4	--	--	--	--	--	--	--	--	-	-	-	-	-	-
(E,E)-2,4-decadienal	-	--	--	0.1	--	--	--	--	--	--	--	--	-	-	-	-	-	-
<i>trans</i> -pinocarveol	-	--	--	1.5	--	--	--	--	--	--	--	--	-	-	-	-	-	-
<i>trans</i> -pinene hydrate	-	--	--	0.6	--	--	--	--	--	--	--	--	-	-	-	-	-	-
verbenone	-	--	--	0.1	--	--	--	--	--	--	--	--	-	-	-	-	-	-
cadina-1,4-diene	-	--	-	-	tr	--	--	--	0.1	--	--	--	-	-	-	-	0.1	tr
α -yanglene	-	--	0.3	-	tr	--	--	--	tr	--	--	--	-	-	-	-	-	-
β -bourbonene	-	--	0.3	-	tr	--	--	--	tr	--	--	tr	-	-	-	-	tr	tr
β -eudesmol	-	--	0.1	-	tr	--	--	--	tr	--	--	--	-	-	-	-	0.1	-
perillene	-	--	0.9	-	tr	--	--	--	tr	--	--	--	-	-	-	-	0.1	tr
methyl thymol	-	--	0.7	-	-	-	--	-	tr	--	--	--	-	-	-	-	-	-
α -longipinene	-	--	0.5	-	tr	-	-	--	tr	--	--	-	-	-	-	-	-	-
cryptone	-	-	0.5	-	tr	-	-	--	tr	-	--	-	-	-	-	-	-	tr
hexadecanoic acid	0.7	-	0.2	-	0.1	-	-	-	0.2	--	--	--	--	--	--	-	--	0.2
β -selinene	-	-	-	0.9	-	-	-	-	--	-	--	0.1	-	-	-	-	--	-
piperitone	-	-	-	0.1	-	-	-	-	-	-	--	-	-	-	-	-	--	-
geraniol	-	-	-	1.2	-	-	-	-	-	-	--	-	-	-	-	-	--	-
Z-sasarone	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	--	-	-	-	-	-	--	--
p-menth-2-en-1-ol	0.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	--	-	-	-	-	--	--	-
δ -elemene	1.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	--	--	-
geranyl acetone	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	--	--	-
Nerolidol	--	-	-	-	-	-	--	-	-	-	-	-	0.14	-	-	-	-	-
Hexahydrofarnesyl acetone	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.37	-	-	-	-	-
δ -fenchol	--	-	0.2	-	0.1	-	-	-	tr	-	-	-	-	-	-	-	0.1	0.1
Total	88,7	94.1	89.5	95.1	98.6	95.2	98.6	98.2	99.0	76.9	98.4	97.65	85.4	82.7	98.0	98.3	99.7	99.3

Tableau 14 : Composition chimique de l'huile essentielle de pistachier d'Algérie (Suite)

	Tipaza			Tizi-Ouzou				Boumerdes	Annaba	Médéa			Oran	Mostaganem	Djelfa	Taref		
	Parties aériennes sèches	Fruits secs	Fruits	Parties aériennes sèches	Fruits secs	Parties aériennes sèches	Feuilles et Fruits broyés et séchés			Fruits secs	Parties aériennes sèches	Parties aériennes sèches					Fruits secs	Feuilles sèches
Procédé	HD																	
Matière Végétale	Parties aériennes sèches	Fruits secs	Fruits	Parties aériennes sèches	Fruits secs	Parties aériennes sèches	Feuilles et Fruits broyés et séchés	Fruits secs	Parties aériennes sèches	Parties aériennes sèches	Fruits secs	Feuilles sèches	Parties aériennes sèches	Feuilles et branches Fraîches	Parties aériennes sèches	Feuilles		
Référence	(Mecherara-Idjeri et al., 2011)		(Amara et al., 2019)	(Mecherara-Idjeri et al., 2011)		(Dob et al., 2011)	(Arab et al., 2014)	(Mecherara-Idjeri et al., 2011)				(Hamiani et al., 2016)	(Dob et al., 2011)	(Arabi et al., 2017)	(Mecherara-Idjeri et al., 2011)	(Benyoussef et al., 2005)		
Composé																		
tricyclene	0.1	0.9	0.7	-	1.6	0.9	0.2	0.2	-	0.3	tr	1.1	0.7	-	0.2	0.24	-	-
α -thujene	0.1	0.1	0.1	-	0.3	0.2	0.2	tr	-	1.5	4.8	0.3	0.2	-	0.6	0.24	-	-
α -pinene	10.8	34.2	43.5	-	29.0	22.0	14.1	2.8	1.665	37.9	28.0	22.7	17.1	9.48	19.0	42.13	0.5	-
camphene	0.6	3.8	3.8	-	6.1	3.7	0.9	tr	-	1.6	1.4	4.3	3.0	-	0.1	1.17	tr	-
sabinene	0.8	4.4	0.4	-	11.7	8.3	5.2	1.3	-	3.7	7.7	8.7	3.5	-	12.6	6.46	0.1	tr
β -pinene	8.5	17.4	17.3	-	5.6	4.3	3.0	3.3	1.1	4.6	6.5	6.6	4.7	tr	6.5	1.76	0.2	3.4
Myrcene	2.4	1.5	7.6	-	1.4	23.0	44.4	-	-	16.8	4.4	3.5	27.0	-	-	-	0.1	2.5
α -phellandrene	0.1	0.3	0.6	-	0.6	0.6	0.7	0.2	0.605	0.3	1.3	0.4	0.4	2.20	0.5	0.61	0.1	0.7
δ -3-carene	tr	tr	0.1	-	0.1	0.1	0.1	0.6	-	tr	tr	0.1	0.2	-	tr	-	-	0.5
α -terpinene	0.3	1.0	0.5	-	2.7	1.1	0.5	tr	0.424	0.3	2.1	2.4	1.7	-	2.6	4.1	0.1	-
p-cymene	0.2	0.3	0.5	-	0.5	1.3	0.9	0.6	-	0.9	0.7	0.8	1.4	8.67	1.8	-	0.1	-
limonene	43.8	6.0	5.8	-	1.9	1.7	1.5	1.2	4.76	3.0	4.9	13.8	6.3	09.11	1.7	1.8	0.1	3.8
β -phellandrene	1.0	2.5	2.5	-	1.9	1.6	1.4	tr	-	1.2	3.4	2.0	1.7	-	2.6	1.75	0.3	-
benzyl alcohol	-	-	-	-	-	-	-	0.3	-	-	-	-	-	-	tr	-	-	-

(Z)- β -ocimene	-	tr	tr	-	0.1	0.7	1.2	0.1	-	1.8	0.1	0.3	0.6	tr	0.2	1.5	-	-
(E)- β -ocimene	0.3	0.3	0.3	-	0.4	2.1	3.5	1.7	-	5.2	0.9	3.8	3.6	-	5.5	0.2	tr	-
2-nonanone	0.5	0.4	0.4	-	0.2	0.2	0.2	0.3	-	0.2	0.3	0.2	0.1	-	0.1	0.8	0.1	0.4
terpinolene	0.5	0.9	1.1	-	1.9	1.1	0.7	0.3	-	0.4	1.1	1.4	1.3	tr	1.2	-	0.2	-
isoamyl 2-methylbutyrate	0.2	0.1	0.1	-	0.2	0.2	0.2		-	0.2	0.2	0.1	0.1	-	-	-	0.1	-
isoamyl isovalerate	tr	0.1	0.1	-	0.4	0.4	0.3	0.5	-	0.1	0.2	0.1	0.1	-	0.5	0.17	tr	-
α -fenchol	0.1	0.1	-	-	0.1	0.1	-	tr	-	-	0.1	0.1	-	-	tr	-	tr	-
<i>cis</i> -p-menth-2-en-1-ol	tr	0.1	0.1	-	0.1	0.2	0.1	1.3	-	tr	0.1	0.1	0.1	-	0.8	-	tr	-
<i>trans</i> -p-menth-2-en-1-ol	0.1	0.1	0.1	-	0.1	0.2	0.1	1.4	-	0.1	0.1	0.2	0.2	-	1.2	-	0.1	-
camphene hydrate	0.1	0.1	0.2	-	0.1	0.1	tr		-	0.1	tr	0.1	0.1	-		-	tr	-
borneol	0.1	0.1	0.3	-	0.1	0.1	0.1	-	-	0.1	tr	tr	0.2	0.8	-	-	0.1	-
terpinen-4-ol	1.1	3.4	0.7	-	5.2	5.1	2.4	7.0	-	1.2	4.3	7.1	6.3	41.24	1.3	6.22	0.7	34.7
α -terpineol	1.5	2.5	2.6	-	0.9	0.8	0.5	1.9	-	0.7	0.8	1.2	1.8	7.31	1.3	2.95	1.1	11.0
myrtenol	tr	0.1	0.1	-	0.1	0.1	tr	0.1	-	tr	0.1	0.1	0.2	-	0.2	-	0.1	-
isoamyl hexanoate	0.1	0.2	0.2	-	0.2	0.2	0.2		-	0.2	0.2	0.2	0.1	-	-	0.21	0.3	0.7
bornyl acetate	0.2	0.8	0.7	-	1.9	1.6	0.9	0.5	-	1.4	0.8	3.0	3.2	-	-	1.03	3.2	-
2-Undecanone	0.9	1.0	0.6	11.72	0.4	0.5	0.4	-	-	0.4	0.7	0.3	0.3	0.7	-	1.05	1.7	0.9
α -terpinyl acetate	tr	-	-	-	-	tr	-	-	-	-	0.5	0.6	-	-	-	-	-	-
δ -elemene	tr	tr		-	tr	tr	-	0.2	-	-	tr	tr	-	-	tr	-	tr	0.2
α -Cubebene	0.1	tr	tr	-	tr	tr	tr	-	-	0.1	tr	tr	tr	-	-	-	0.1	-
α -copaene	0.4	0.2	tr	-	0.1	0.1	0.2	-	-	0.2	0.2	0.1	tr	-	-	-	0.4	-
β -Elemene	0.6	0.6	0.1	-	0.4	0.4	0.4	-	-	0.4	0.5	0.4	0.2	-	-	0.13	1.0	4.2

Benzyl isovalerate	0.1	-	0.1	-	0.1	0.2	0.1	-	-	0.1	-	0.2	0.2	-	-	-	0.9	-
isocaryophyllene	-	0.2	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2	-	-	-	-	-	-	-
β -Caryophyllene	2.7	2.8	1.3	9,6	4.3	2.5	2.1	-	3.219	1.2	2.4	2.0	1.9	12.62	-	4.43	19.3	2.7
β -gurjunene	0.2	0.1	0.1	-	0.2	0.1	0.1	-	-	0.1	0.2	0.1	0.1	-	-	-	0.9	-
isoamyl benzoate	0.1	0.1	tr	-	0.1	Tr	tr	-	-	0.1	0.1	0.1	0.5	-	-	-	0.2	-
α -humulene	0.9	0.5	0.2	-	0.5	0.4	0.4	2.0	-	0.5	0.7	0.2	0.2	-	0.7	0.73	2.9	0.8
allo-aromadendrene	0.4	0.2	tr	-	0.1	0.1	0.2	0.4	-	0.2	0.2	0.1	tr	-	-	-	0.6	-
γ -muurolene	0.7	0.4	0.1	-	0.2	0.3	0.5	5.7	-	0.5	0.5	0.2	0.1	-	2.0	0.24	2.2	-
γ -gurjunene	0.2	0.1	0.1	-	0.1	-	-	-	-	-	0.1	tr	tr	-	-	-	0.4	-
germacrene D	10.3	2.8	0.6	-	5.2	2.9	2.1	0.2	-	3.6	6.3	1.7	0.8	-	0.1	1.35	2.3	8.4
epi-bicyclosesquiphellandrene	0.1	0.1	0.1	-	tr	tr	0.1	-	-	0.1	0.1	0.1	tr	-	-	-	0.7	-
Bycyclogermacrene	0.2	0.1	tr	-	0.1	0.1	0.2	-	-	0.2	0.1	0.4	tr	-	-	-	0.8	0.4
α -muurolene	0.8	0.6	0.3	-	0.5	0.4	0.5	0.7	-	0.4	0.6	0.1	0.1	-	0.5	0.23	3.4	0.5
β -bisabolene	0.1	0.1	0.1	-	0.1	0.1	0.1	0.2	-	0.1	0.2	0.2	0.1	-	-	-	0.8	-
γ -cadinene	0.3	0.2	0.1	-	0.2	0.2	0.3	2.4	-	0.6	0.3	0.1	0.1	-	1.1	0.16	1.8	0.7
δ -cadinene	1.6	1.3	0.5	-	1.0	1.0	1.3	0.1	-	1.0	1.3	0.6	0.5	-	tr	-	5.7	1.6
Cubebol	0.1	0.1	tr	-	0.1	tr	0.1	-	-	tr	0.1	tr	tr	-	-	-	0.4	-
cubenene	0.1	0.1	-	-	0.2	tr	-	-	-	0.1	0.1	-	-	-	-	0.97	0.2	-
α -cadinene	0.1	0.1	0.1	-	0.2	0.1	0.1	-	-	0.1	0.1	0.1	0.1	-	tr	-	0.4	-
Elemol	0.1	0.1	tr	-	0.1	-	tr	-	-	0.1	tr	0.1	tr	-	-	-	0.3	0.2
germacrene D 4-ol	tr	-	0.1	-	0.1	0.2	0.2	-	-	0.3	0.1	-	0.2	-	-	-	0.8	-
spathulenol	0.1	0.1	tr	-	0.1	tr	tr	-	13.353	tr	tr	0.1	tr	-	-	0.17	3.5	-
caryophyllene oxide	0.2	0.1	0.1	-	0.2	0.3	0.3	1.4	-	0.2	0.1	0.1	0.2	-	1.1	0.1	4.8	0.3

viridiflorol	tr	tr		-	tr	0.1	-	-	-	-	0.1	tr	-	-	-	0.4	-	
humulene epoxide II	0.1	tr	tr	-	tr	0.1	0.1	0.1	-	0.1	tr	tr	0.1	-	0.1	-	1.3	-
1-epi-cubenol	0.3	0.2	0.2	-	0.2	0.3	0.4	-	-	0.2	0.2	tr	0.1	-	-	-	1.0	-
γ -eudesmol	0.1	0.2	tr	-	0.1	0.1	0.1	-	-	0.1	tr	-	0.1	-	-	-	0.6	-
T-muurolol	1.0	0.8	0.3	-	1.1	1.3	1.2	0.6	-	0.5	0.9	0.4	0.5	-	0.4	0.24	3.4	2.0
α -muurolol	0.2	0.2	0.1	-	0.2	0.3	0.3	-	-	0.1	0.2	0.1	0.1	-	-	-	0.7	0.7
t-cadinol	0.2	0.1	0.2	-	0.1	0.2	0.2	-	-	0.2	0.2	0.1	0.1	-	-	-	0.8	
α -cadinol	1.3	1.0		6,66	1.5	1.5	-	0.2	4.112		1.2	0.5		-	tr	-	4.6	2.6
α -bisabolol	0.1	0.1	0.2	-	0.2	0.2	0.2	-	-	0.2	0.3	0.3	0.2	-	-	-	1.3	1.5
epi-a-bisabolol	0.1	0.1		-	0.1	0.1	-	-	-		0.1	0.1		-	-	-	2.0	-
Benzyl Benzoate	0.1	0.1	0.1	-	0.1	tr	tr		-	tr	tr	tr	0.1	-	-	0.11	1.9	-
cuminaldehyde	-	-	0.2	-	-	-	tr	1.3	-	tr	-	-	tr	-	0.3	-	-	-
α -terpinen-7-al	-	-	-	-	-	-	-	0.4	-	-	-	-	-	-	0.4	-	-	-
globulol	-	-	-	-	-	-	-	tr	-	-	-	-	-	0.8	tr	0.13	-	-
(Z)-3-hexenyl benzoate	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.6	-	-	-
β -oploponone	-	-	-	-	-	-	-	0.7	-	-	-	-	-	-	0.1	-	-	-
α -acorenol	-	-	-	-	-	-	-	0.7	-	-	-	-	-	-	0.4	-	-	-
(E)-nerolidol	-	-	-	-	-	-	-	0.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
cis-carveol	-	-	tr	-	-	-	tr	0.1	-	tr	-	-	tr	-	tr	-	-	-
β -bisabolol	-	-	-	-	-	-	-	0.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
elemicin	-	-	-	-	-	-	-	0.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(2Z, 6E)-farnesol	-	-	-	-	-	-	-	0.1	-	-	-	-	-	-	tr	-	-	-
β -Myrcene	-	-	-	-	-	-	-	-	1.255	-	-	-	-	-	0.9	-	1.36	-
trans-Ocimene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

γ -Terpinene	0.6	1.8	0.9	-	4.1	2.1	1.1	-	0.828	0.8	3.4	3.9	3.3	-	-	6.21	0.3	1.7
α -Terpinene	-	-	-	-	-	-	-	-	1.424	-	-	-	-	-	-	2.18	-	-
<i>trans</i> -carveol	-	-	tr	-	-	-	tr	0.2	-	tr	-	-	tr	-	tr	-	-	-
α -campholenal	-	-	-	-	-	-	-	0.7	-	-	-	-	-	-	0.7	-	-	-
β -bourbonene	-	-	-	-	-	-	-	0.4	-	-	-	-	-	-	0.3	-	-	-
α -ylangene	-	-	-	-	-	-	-	0.3	-	-	-	-	-	-	0.2	-	-	-
longifolene	-	-	-	-	-	-	-	16.4	-	-	-	-	-	-	5.2	-	-	-
<i>cis</i> -muurolo-4 (14),5-diene	-	-	-	-	-	-	-	0.2	-	-	-	-	-	-	0.4	-	-	-
tridecane	-	-	-	-	-	-	-	0.4	-	-	-	-	-	-	0.3	-	-	-
β -Cadinene	-	-	-	7,45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.09	-	-
Bergamotene	-	-	-	8.34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
α -Terpinolene	-	-	-	23,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3-Cyclohexen1-ol	-	-	-	12,4	-	-	-	-	3.736	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-Comphene	-	-	-	-	-	-	-	-	0.29	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-terpinen-4-ol	-	-	-	-	-	-	-	-	3.832	-	-	-	-	-	-	-	-	-
β -Cubebene	-	-	-	-	-	-	-	-	5.539	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L- α -bornyl acetate	-	-	-	-	-	-	-	-	1.192	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1-(3-methylcyclopent-2-enyl)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.733	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,8-cineol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.4

Amyl-Benzoate	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.4
epiglobulol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2
Cubenol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.11	-	tr
tetradecanoic acid	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.3
oleic acid	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.3
geranic acid	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3
O-cymene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.72	-	
Z-sabinene hydrate	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.8
E- sabinene hydrate	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.6
Cis vebenol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3
E--piperitol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.4
P-alyl-anisol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.6
β - Bisabolene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.58
α -copaene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2
Manool oxyde	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	-	-
Bisabolol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	-	-
Epi-Cadinol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.55	-	-
Valencene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.12	-	-
amyl benzoate	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.4
Verbenol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.7	-	-	-	-
2-Tridecanol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	-	-
Isopentyl hexanoate	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.37	-	-
β -citronellene	-	-	-	-	-	-	-	0.8	-	-	-	-	-	-	-	1.1	-	-

1-octen-3-ol	-	-	-	-	-	-	-	0.2	-	-	-	-	-	-	2.3	-	-	-
β -ocimene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1
amyl isobutyrate	-	-	-	-	-	-	-	0.2	-	-	-	-	-	-	t	0.49	-	tr
p-mentha-3,8-diene	-	-	-	-	-	-	-	0.2	-	-	-	-	-	-	t	-	-	-
linalool	-	-	-	-	-	-	-	0.4	-	-	-	-	-	1.4	tr	0.12	-	0.5
2-nonanol	-	-	-	-	-	-	-	0.7	-	-	-	-	-	-	0.7	-	-	0.4
<i>trans</i> -b-terpineol	-	-	-	-	-	-	-	15.6	-	-	-	-	-	-	13.1	-	-	-
isoamyl salicylate	-	-	-	-	-	-	-	0.4	-	-	-	-	-	-	tr	-	-	-
carvone	-	-	-	-	-	-	-	-	2.805	-	-	-	-	-	tr	-	-	-
<i>trans</i> -pinocarveol	-	-	-	-	-	-	-	0.7	-	-	-	-	-	-	0.4	-	-	-
verbenone	-	-	-	-	-	-	-	0.2	-	-	-	-	-	-	0.2	-	-	-
<i>trans</i> -piperitol	-	-	-	-	-	-	-	0.1	-	-	-	-	-	-	tr	-	-	-
cadina-1,4-diene	-	-	tr	-	-	-	0.1	-	-	0.1	-	-	0.1	-	-	-	-	-
β -eudesmol	-	-	0.2	-	-	-	-	-	-	0.2	-	-	0.1	-	-	-	-	-
perillene	-	-	tr	-	-	-	0.1	-	-	tr	-	-	tr	-	-	-	-	-
methyl thymol	-	-	0.1	-	-	-	tr	-	-	tr	-	-	tr	-	-	-	-	-
hexadecanoic acid	-	-	tr	-	-	-	0.1	-	-	0.1	-	-	tr	-	-	-	-	-
β -selinene	-	-	-	-	-	-	-	0.7	-	-	-	-	-	-	0.3	-	-	-
piperitone	-	-	-	-	-	-	-	0.4	-	-	-	-	-	-	0.2	-	-	-
geraniol	-	-	-	-	-	-	-	1.8	-	-	-	-	-	-	1.0	-	-	-
Isodene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.9	-	-	-	-
Muurolol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.34	-	-
Nonanol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.42	-	-
δ -elemene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2
geranyl acetate	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1
Undecanone	-	-	-	-	-	-	-	-	5.58	-	-	-	-	-	-	-	-	-

3-carene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.8	-	-	-	-
δ--fenchol	-	-	0.2	-	-	-	0.1	-	-	0.1	-	-	0.1	-	-	-	-	-
Total	99.0	98.3	98.1	79.9	97.7	98.2	98.7	85.1	60.92	97.6	96.8	98.1	97.0	96.83	94.7	99.9	82.4	99.88

Tableau 15: Composition chimique des huiles essentielles de pistachier de différents pays

Origine	Chypre	Israël	Italie	Tunisie	Espagne	Maroc	Turquie
Procédé	HD						
Référence	(Barazani et al, 2003)	(Barazani et al, 2003)	(Milia et al., 2020 ; Negro et al., 2014)	(Bachrouch et al., 2013 ; Maaroufi et al., 2021 ; Selmi et al., 2020 ; Barazani et al, 2003)	(Llorens-Molina et al., 2015 ; Fernández et al., 2000)	(Hafsé et al., 2013 ; Aouinti et al., 2013 ; Amhamdi et al., 2009 ; Haloui et al., 2015 ; Mharti et al., 2011 ; Aouinti et al., 2013 ; Derwich et al., 2010)	(Kıvçak et al., 2008)
Composé							
tricyclene	-	-	(0-0.8)	(0.32-2.09)	(tr-0.3)	(0-8.16)	-
α-thujene	0-0.3	0.0	(0-2.8)	(0-1.90)	(tr-0.2)	(0-1.70)	-
α-pinene	24.1-49.0	(13.8-16.2)	(2.4-16.89)	(0.60 -42.7)	(2.4 -19)	(0-24.25)	(0-0.6)
camphene	0.0-1.2	(0.5-1.0)	(0.2-3.5)	(0.0-2.3)	(tr-1.5)	(0-3.10)	(0.5-19.4)
sabinene	1.2-12.2	(0.7-0.7)	(0-7.73)	(0.07 -45.8)	(0.5-6.1)	(0-6.96)	(0-0.3)
β-pinene	7.4-8.6	(1.9-3.9)	(0.3-9.4)	(0.24 -14.1)	(0.7-6.4)	(0-12.58)	(1.8-23.2)
Myrcene	1.0-1.6	(1.9-1.1)	-	(0.35 -1.2)	(0.3-11)	(0-39.2)	(1.1-2.8)
α-phellandrene	0.0-0.8	(1.1-0.4)	(0.2-7.39)	(0.45 -3.20)	(0-1)	(0-3.36)	(0-2.2)
δ-3-carene	-	-	(0-6.1)	(0.33 -2.75)	(tr-7.2)	(0-54.10)	(0-2.3)
α-terpinene	-	-	(0.6-7.2)	-	(tr-1.7)	(0-2.3)	
p-cymene	-	-	(0.5-8.7)	(0-0.14)	(0.2-4.7)	(0-5.04)	(0-1.1)
limonene	6.1-40.6	(45.5-29.5)	(1.0-6.8)	(0.34-19.11)	(0-8.5)	(0-24.99)	-

β -phellandrene	1.2-6.4	(3.3-4.2)	(1.1-6.2)	(0-9.9)	-	(0-1.15)	-
benzyl alcohol	-	-	-	-	-	-	(0.4-6.5)
(Z)- β -ocimene	0.0	(0.0-0.2)	-	(0-1.8)	(0-tr)	(0-6.90)	-
(E)- β -ocimene	0.0	(0.0-0.6)	(0-0.24)	(0-5.3)	(tr-0.3)	(0-2.65)	-
terpinolene	-	-	(0.3-3.25)	(0-0.37)	(0-0.9)	(0-0.5)	-
isoamyl 2-methylbutyrate	-	-	-	-	-	(0-4.45)	(0-0.5)
isoamyl isovalerate	-	-	-	(0-1.6)	(0-0.3)	-	-
α -fenchol	-	-	(0-0.11)	-	-	-	(0-0.1)
<i>cis</i> -p-menth-2-en-1-ol	-	-	-	(0-0.12)	-	-	-
<i>trans</i> -p-menth-2-en-1-ol	-	-	-	-	-	-	(0-0.4)
camphene hydrate	-	-	-	-	-	-	(0.1-0.6)
borneol	-	-	(0-0.7)	(0-0.88)	(0-0.2)	(0-0.5)	-
terpinen-4-ol	-	-	(0.7-21.7)	(0-41.24)	(1.8-6.7)	(0-7.44)	-
α -terpineol	-	-	(0.3-3.98)	(0-9.79)	(1-2.8)	(0-7.23)	(5.7-29.2)
myrtenol	-	-	-	-	(0-0.3)	-	(0.4-3.5)
isoamyl hexanoate	-	-	-	-	-	-	(0-0.2)
bornyl acetate	-	-	(0-6.5)	(0-2.0)	(0.3-1.4)	(0-3.32)	(0.4-1.8)
2-Undecanone	0.0-0.3	-	(0-0.85)	(0-1.6)	(0.3-1.6)	(0-0.9)	(0.1-1.4)
α -terpinyl acetate	-	-	-	-	-	-	(0-2.8)
α -Cubebene	-	-	(0.05 -0.6)	(tr-0.11)	(0-0.3)	(0-1.21)	-
α -copaene	-	-	(0.1-3.2)	-	(0-1.8)	(0-0.83)	-
β -Elemene	0.0-2.9	(1.1-0.0)	(0-0.9)	(0-0.83)	(0-0.4)	(0-1.74)	(0.6-1.3)
Benzyl isovalerate	-	-	-	-	-	-	(0.8-1.5)
β -Caryophyllene	0.0-3.7	(5.4-13.2)	(0-19.9)	(0-38.33)	(6.9-13.1)	(0-11.19)	(0-0.4)

β -gurjunene	-	-	-	-	-	(0-7.8)	-
isoamyl benzoate	-	-	-	-	(0-0.5)	-	-
α -humulene	0.7-1.2	(1.3-2.4)	(0-2.9)	(0-1.6)	(1.3-3)	(0-1.75)	(0.1-0.3)
allo-aromadendrene		-	(0-0.14)	(0-0.44)	(0-0.2)	(0-1.4)	(1.3-2.4)
γ -muurolene	0.0-0.4	(0.0-0.0)	(0.2-7.4)	(0-1.3)	-	-	(0.5-1)
γ -gurjunene	-	-	-	-	(0-0.3)	(0-1.73)	(0.8-2.7)
germacrene D	10.0-18.8	(22.3-26.0)	(0-2.73)	(0-18.7)	(2.3-17.5)	(0-5.17)	-
epi-bicyclosquiphellandrene	-	-	-	-	-	(0-3.5)	(0.7-14.1)
Bycyclogermacrene	-	-	-	-	(0-1.6)	-	-
α -muurolene	0.0	0.0	(0.1-6.9)	0	(0-3.4)	(0-2.7)	(0-0.4)
β -bisabolene	-	-	(0-0.6)	-	(0-0.1)		(0.6-1.8)
γ -cadinene	-	-	(0.2-2.5)	(0-3.3)	(0.5-1.1)	(0-2.68)	
δ -cadinene	-	-	(0-11.7)	(0-1.4)	(3.6-8.1)	(0-6.7)	(0.1-0.6)
Cubebol	-	-	-	-	-	-	(0.4-1.7)
cubenene	-	-	-	-	-	-	(0.3-0.6)
α -cadinene	-	-	(0-0.07)	-	(0-0.1)	(0-1.90)	-
Elemol	-	-	-	-	(0-0.1)	-	-
germacrene D 4-ol	-	-	-	-	-	-	(0-0.2)
spathulenol	-	-	-	-	(0-1.4)	(0-0.86)	-
caryophyllene oxide	-	-	-	(0-5.1)	(0-0.9)	(0-6.05)	-
viridiflorol	-	-	-	-	(0-0.8)	-	(0.3-3.3)
humulene epoxide II	-	-	-	(0-0.23)	-	-	
1-epi-cubenol	-	-	-	(0-0.42)	-	-	(0-1.2)
γ -eudesmol	-	-	-	-	-	-	(0-0.2)
T-muurolol	-	-	-	(0-4.3)	-	-	
α -muurolol	-	-	(0-0.94)	-	(0-0.5)	-	(0.3-1.7)
t-cadinol	-	-	-	-	-	(0-4.35)	(0.1-0.8)

α -cadinol	-	-	-	(0-4.4)	-	(0-2.72)	(0-0.2)
α - bisabolol	-	-	-	(0-1.1)	-	-	-
Benzyl Benzoate	-	-	-	-	-	(0-0.2)	-
globulol	-	-	-	-	(0-1.1)	(0-0.05)	-
Z-3-hexenyl benzoate	-	-	-	-	(0-0.2)	-	-
α - elemene	-	-	-	(0-1)	-	-	-
elemicin	-	-	-	-	(0-0.1)	(0-0.1)	-
β -Myrcene	-	-	-	(0-30.0)	-	-	-
γ -Terpinene	0.0-0.2	-	-	(0-2.95)	(0.2-3)	(0-0.63)	-
1-Methyladamantane	-	-	-	-	-	-	(0-1.8)
Vitispirane	-	-	-	-	-	(0-0.1)	-
<i>trans</i> -carveol	-	-	-	-	-	(0-0.62)	(0.6-3)
α -campholenal	-	-	-	(0-0.36)	-	-	-
Ylangene	-	-	-	-	-	(0-0.2)	-
β -Bourbonene	-	-	-	-	-	(0-0.1)	-
α -ylangene	-	-	(0-0.7)	-	-	-	(0-0.4)
longifolene	-	-	-	-	-	(0-1.8)	(0-0.1)
Aromadendrene	-	-	-	-	(0-1.2)	(0-0.85)	(0.3-7.1)
α -Amorphene	-	-	(0-2.1)	(0-4.0)	-	(0-1.3)	(0-0.4)
Geranyl acetone	-	-	-	-	(0-0.2)	-	-
Valencene	-	-	-	-	-	-	(0-0.3)
(E,E)- α -Farnesene	-	-	-	-	-	-	(0-0.3)
Cadina-1,4-diene	-	-	-	(0-3)	-	-	(0.3-0.7)
α -Calacorene	-	-	-	-	-	-	(0-0.1)
<i>cis</i> -muurola-4 (14),5-diene	-	-	-	-	-	-	(0-0.1)
Hexahydrofarnesyl acetone	-	-	-	-	-	-	(0-0.1)

Octacosane	-	-	-	-	-	-	(0-0.7)
β -Cadinene	-	-	-	-	-	-	(0-0.8)
Bergamotene	-	-	-	-	-	-	(0-0.1)
α - Terpinolene	-	-	-	(0-0.89)	-	-	
3-Cyclohexen-1-ol	-	-	-	-	-	-	(0-0.3)
R-Comphene	-	-	-	-	-	-	(0-0.3)
L-terpinen-4-ol	-	-	-	-	-	-	(0-0.2)
β - Cubebene	-	-	-	(0-1.1)	-	(0-0.63)	(0-0.1)
L- α -bornyl acetate	-	-	-	-	-	-	(0-0.1)
1-(3-methylcyclopent-2-enyl)	-	-	-	-	-	-	(0-0.8)
1,8-cineole	-	-	-	(0-2.04)	-	(0-2.3)	(0-0.1)
Trans sabinene hydrate	-	-	-	-	-	-	(0-0.5)
3,8-Carvomethenediol	-	-	-	-	-	-	(0-0.6)
D fenchyl alcohol	-	-	-	-	-	-	(0-0.2)
Exo-mentyl-camphenylol	-	-	-	-	-	-	(0-0.2)
Borneol Acetate	-	-	-	(0-1.22)	-	-	(0-0.7)
Methyl- eugenol	-	-	-	-	-	(0-0.1)	-
Isobutyrate phenyl	-	-	-	-	-	-	(0-0.2)
Acetate 3- methylbutyl	-	-	-	-	-	-	(0-0.4)
Z-asarone	-	-	-	-	-	-	(0-0.7)
epiglobulol	-	-	-	-	-	-	(0-1.2)
Cubanol	-	-	-	-	-	-	(0-0.4)
Myristic acid	-	-	-	-	(0-0.5)	-	

Palmetique acide	-	-	-	-	-	-	(0-0.1)
tetradecanoic acid	-	-	-	-	-	-	(0-0.2)
oleic acid	-	-	-	-	-	-	(0-0.3)
O-cymene	-	-	-	(0-4.5)	-	-	-
α - humulene	-	-	-	(0-1.4)	-	-	-
β --Bisabolene	-	-	-	-	(0-0.6)	-	-
Bisabolol	-	-	-	-	(0-0.9)	-	-
Isopentyl hexanoate	-	-	(0-0.24)	-	-	(0-0.3)	-
α -farnesene	-	-	-	-	-	(0-0.07)	-
linalool	-	-	-	(0-0.58)	-	(0-2.85)	-
carotol	-	-	-	-	-	(0-0.2)	-
trans-Pinocarveol	-	-	-	(0-0.24)	(0-0.2)	-	-
Verbenone	-	-	-	(0-0.18)	(0-tr)	-	-
cadina-1,4-diene	-	-	-	-	(0-0.7)	(0-5.1)	-
β --bourbonene	-	-	-	-	(0-0.1)	(0-1.3)	-
β -selinene	-	-	(0-1.4)	-	-	-	-
piperitone	-	-	(0-0.05)	-	-	-	-
geraniol	-	-	-	(0-0.36)	-	(0-0.58)	-
Borneol	-	-	-	-	(0-0.2)	-	-
Nonadecanone	-	-	-	(0-0.36)	-	-	-
Isoledene	-	-	-	-	-	(0-1.9)	-
(E)-2-Hexenal	-	-	-	(0-1.29)	(0-tr)	-	-
Tridecane	-	-	-	(0-0.09)	-	-	-
α --Terpenyl acetate	-	-	-	(1-2.19)	-	-	-
Copaene	-	-	-	-	-	(0-0.3)	-
Camphor	-	-	-	-	-	(0-1.2)	-

δ -muurolene	-	-	-	-	-	(0-1.7)	-
p-Cymenene	-	-	(0-0.12)	-	-	(0-0.59)	-
p-cymen-8-ol	-	-	-	-	(0-0.8)	(0-1.6)	-
Undecanone	-	-	-	-	-	(0-0.80)	-
Benzoic acid, pentyl ester	-	-	-	-	-	(0-0.57)	-
Calamenene	-	-	(0-5.6)	-	-	(0-0.80)	-
3-carene	-	-	-	-	-	(0-5.18)	-
Pinocarvone	-	-	-	-	(0-0.1)	-	-
Myrtenal	-	-	-	-	-	(0-0.50)	-
Humulene epoxide-I	-	-	-	-	-	(0-0.5)	-
isoamyl isobutyrate	-	-	(0-0.55)	-	-	-	-
2-methylbutyl butanoate	-	-	(0-0.18)	-	-	-	-
isopentyl isivalerate	-	-	(0-0.13)	-	-	-	-
n-amyl isovalerate	-	-	(0-0.04)	-	-	-	-
<i>Cis</i> - β -terpineol	-	-	(0-0.13)	-	-	-	-
borneol-endo	-	-	(0-0.16)	-	-	-	-
γ -terpineol	-	-	(0-0.07)	-	-	-	-
2-methylbutyl hexanoate	-	-	(0-0.17)	-	-	-	-
β -maaliene	-	-	(0-0.33)	-	-	-	-
<i>Z</i> -Caryophyllene	-	-	(0-1.39)	-	-	(0-1.6)	-
(<i>E</i>)-caryophyllene	-	-	(0-0.07)	-	-	-	-
<i>Cis</i> -dihydro apofarnesal	-	-	(0-0.14)	-	-	-	-
<i>Trans</i> -cadin-1(2),4-diene	-	-	(0-0.15)	-	-	-	-
<i>Cis</i> -muurol-5-en-4- β -ol	-	-	(0-0.07)	-	-	-	-
<i>Trans</i> -cadin-4-en-7-ol	-	-	(0-0.31)	-	-	-	-
epi- α -cadinol	-	-	(0-1.22)	-	-	-	-

cedr-8(15)-en-9- α -ol	-	-	(0-0.12)	-	-	-	-
Aromadendreneoxide	-	-	-	-	-	(0-3.82)	-
Endo-borneol	-	-	-	-	-	(0-0.49)	-
Muurolene	-	-	-	-	-	(0-1.49)	-
Cadalene	-	-	(0-1.4)	-	-	-	-
β -Cubebene	-	-	(0-4.0)	-	-	-	-
Thymol	-	-	(0-2.1)	-	-	-	-
1,4-Cadinadiene ^a	-	-	(0-0.8)	-	-	-	-
Carvone	-	-	(0-0.8)	-	(0-tr)	(0-0.44)	-
p-Menthatriene	-	-	-	-	-	(0-0.49)	-
Isoamyl valerate	-	-	-	-	(tr-0.2)	-	-
cis-Sabinol!	-	-	-	-	(tr-0.2)	-	-
Isoamyl octanoate	-	-	-	-	(0-0.3)	-	-
(Z)-3-Hexenyl isovalerate	-	-	-	-	(0-0.1)	-	-
Isoamyl hexanoate	-	-	-	-	(0-0.4)	-	-
10-epi-y-Eudesmol!	-	-	-	-	(0-3.5)	-	-
α -Cadinol isomer!	-	-	-	-	(0-4.3)	-	-
2,4,6-Trimethylbenzaldehyde	-	-	-	-	(0-2.7)	-	-
2,4,5-Trimethylbenzaldehyde	-	-	-	-	(0-2.2)	-	-
Carvotanacetone	-	-	-	-	(0-0.1)	-	-
Γ -Terpinene	-	-	-	-	-	(0-0.7)	-
Fonenol	-	-	-	-	-	(0-0.2)	-
Nerolidol	-	-	-	-	-	(0-0.2)	-
α -Truxene	-	-	-	-	-	(0-1.7)	-
2,5-Dibutyfuran	-	-	-	-	-	(0-3.6)	-

Pinane, 2,3-epoxide	-	-	-	-	-	(0-0.2)	-
α -Guaiene	-	-	-	-	-	(0-2.4)	-
Himachalene	-	-	-	-	-	(0-7.4)	-
Himachala-2,4-diene	-	-	-	-	-	(0-3.7)	-
Ledene oxide-(II)	-	-	-	-	-	(0-0.2)	-
Hexenyl valerate	-	-	-	-	-	(0-0.2)	-
Germanicol	-	-	-	-	-	(0-12.8)	-
Terpinyl propionate	-	-	-	-	-	(0-6.7)	-
Epizonarene	-	-	-	-	-	(0-0.4)	-
Carnegine	-	-	-	-	-	(0-0.5)	-
Agarospinol	-	-	-	-	-	(0-0.3)	-
Patchoulene	-	-	-	-	-	(0-2.5)	-
<i>trans</i> - α -Terpinyl	-	-	-	-	-	(0-1.3)	-
<i>p</i> -Metha-1.8-diene	-	-	-	-	-	(0-2.9)	-
Thunbergol	-	-	-	-	-	(0-8.8)	-
Isopseudocumenol	-	-	-	-	-	(0-2)	-
Caprylone	-	-	-	-	-	(0-0.3)	-
1 <i>R</i> - α -Pinene	-	-	-	-	-	(0-2.9)	-
3,3-Dimenthol	-	-	-	-	-	(0-6.2)	-
Pseudocumenol	-	-	-	-	-	(0-2.7)	-
Furanone	-	-	-	-	-	(0-0.2)	-
Muurolol	-	-	-	-	-	(0-2.8)	-
Cymene	-	-	-	-	-	(0-0.01)	-
Verbenol	-	-	-	-	-	(0-3.05)	-
<i>e-z</i> -farnesol	-	-	-	-	-	(0-0.2)	-
β -Cyclocitral	-	-	-	-	-	(0-0.1)	-
<i>z-z</i> -farnesol	-	-	-	-	-	(0-0.4)	-

α -terpinene	-	-	-	-	-	(0-1.7)	-
(Z)-3-hexenyl n-hexanoate	-	-	-	-	(0-0.1)	-	-
3-methyl-1-butyl benzoate	-	-	-	-	(0-0.3)	-	-
Limonene + β -Phellandrene	-	-	-	-	(0-5.4)	-	-
Isoarnyl benzoatet	-	-	-	-	(0-0.5)	-	-
β -Cubebene + β -Elemene	-	-	-	-	-	-	-
Terpinolene + 2-Nonanone	-	-	-	-	(0-1)	-	-
Linalool + α -Campholenic aldehyde	-	-	-	-	-	-	-

- **Nature et état de la matière végétale**

Dans le tableau 16 sont donnés les rendements d'études antérieures en huile essentielle de pistachier obtenue par hydrodistillation pour une durée d'extraction fixée à 3 h à partir de différentes parties de la plante. Pour une durée de 3 h, l'utilisation des feuilles sèches comme matière végétale permet d'obtenir un rendement maximal de (1.28 ± 0.08) % dans le cas de l'Algérie et (1.02%) dans le cas du Maroc.

Tableau 16: Influence de la nature et l'état du matériel végétal sur le rendement en huile essentielle de pistachier obtenue par hydrodistillation

Origine	Région	Matière Végétale	Rendement(%)	Référence
Maroc	Gerssif	Feuilles sèches	0,2	(Mharti et al., 2011)
	sekoura (Fez)	Feuilles sèches	1,02	(Derwich et al., 2010)
	Taforalt	Feuilles sèches	0,13	(Aouinti et al., 2013)
	Jerada		0,23	
	Saïdia		0,14	
	Saïdia	Feuilles sèches	0,15	(Aouinti et al., 2013)
		Feuilles sèches	0,56	
Tafoghalt	Feuilles	0,14	(Amhamdi et al., 2009)	
Tunisie	1	Feuilles mures et sèches	$0,06 \pm 0,01$	(Maarouf et al., 2021)
	2		$0,06 \pm 0,05$	
Algérie	Tipaza	Feuilles sèches	0,21	(Mecherara-Idjeri, 2007)
		Fruits secs	0,27	
		Rameaux secs	0,10	
	Alger	Feuilles sèches	0,11	
		Fruits secs	0,20	
		Rameaux secs	0,09	
	Jijel	Feuilles sèches	0,07	
		Fruits secs	0,33	
		Rameaux secs	0,24	
	Mostaganem	Feuilles et branches fraîches	0,39	(Arabi et al., 2017)
	Taref	Feuilles	0,02	(Benyoussef et al., 2005)
	Alger (forêt de Bainem)			
	Alger	Parties aériennes sèches	0,12	(Dob et al., 2011)
	Oran		0,11	
	Tizi-Ouzou		0,20	
17 régions	Parties aériennes sèches	0,1-0,3	(Mecherara-Idjeri et al., 2011)	
Alger (forêt de Bainem)	Feuilles+ tiges	0,0174	(Nacer-Bey, 2003)	
Bouira	Feuilles sèches	$1,28 \pm 0,08$	(Medjkane et al., 2016)	
9 régions	Fruits secs	0,2-0,8	(Mecherara-Idjeri et al., 2011)	

2.3.2.2.1 Paramètres opératoires

- Durée

Les résultats des études antérieures rassemblés dans le tableau 17 montrent que la durée d'extraction influe sur le rendement d'HE obtenue à partir des feuilles de pistachier. L'utilisation des feuilles Algériennes permet d'obtenir un bon rendement (1.28 ± 0.08) % avec une durée d'extraction de 3 heures. Les durées d'extraction d'après ce tableau varient entre 2 et 4 heures.

Tableau 17: Influence de la durée d'extraction par hydrodistillation sur le rendement en huile essentielle des feuilles de pistachier

Origine	Région	Rendement(%)	Durée d'extraction	Référence
Maroc	Fez	0,2	4h	(Hafsé et al., 2013)
	Gerssif(Berkin)	0,2	3h	(Mharti, et al., 2011)
	sekoura (Fez)	1,02	3h	(Derwich et al., 2010)
	Taounate	0,3	4h	(Haloui et al., 2015)
	Taforalt	0,13	3h	(Aouinti et al., 2013)
	Jerada	0,23		
	Saidia	0,14		
	Saidia	0,15	3h	(Aouinti et al., 2013)
		0,56		
Tafoghalt	0,14		(Amhamdi et al., 2009)	
Tunisie	Oued El Bir	0,009	2h	(Bachrouch et al., 2013)
	Jebel Mansour	0,02		
	Siliana	0,007		
	Tabarka	0,01	4h	(Selmi et al., 2020)
	Tabarka	0,07		
	1	$0,06 \pm 0,01$	2 -3 h	(Maarouf et al., 2021)
	2	$0,06 \pm 0,05$		
Italie	Sardinia	0,41	4h	(Milia et al., 2020)
	Melendugno	$0,3 \pm 0,1$	2h	(Negro et al., 2014)
	Avetrana	$0,5 \pm 0,2$		
	Castro	$0,2 \pm 0,1$		
	Gallipoli	$0,3 \pm 0,2$		
	Gagliano del Capo	$0,2 \pm 0,1$		
	Apani	$0,4 \pm 0,1$		
	Cardigliano	$0,2 \pm 0,1$		
Espagne	Xeraco	$0,13 \pm 0,03$	2.5h	(Llorens-Molina et al., 2015)
	Segart	$0,12 \pm 0,02$		
Algérie	Tipaza	0,21	3h	(Mecherara-Idjeri, 2007)
	Alger	0,11	3h	(Mecherara-Idjeri, 2007)
	Jijel	0,07	3h	(Mecherara-Idjeri, 2007)
	Mostaganem	0,39	3h	(Arabi et al., 2017)
	Taref	0,02	3h	(Benyoussef et al., 2005)
	Alger (forêt de Bainem)			
	Bouira	$1,28 \pm 0,08$	3h	(Medjkane et al., 2016)
	9 régions	0,2-0,8	3h	(Mecherara-Idjeri et al., 2011)

2.3.3 *Mentha spicata* L. (Menthe verte)

2.3.3.1 Composition chimique

Les tableaux 19 et 20 donnent la composition chimique de l'huile essentielle de menthe verte venant de différentes régions d'Algérie et de divers pays du monde respectivement.

Les résultats donnés par ces tableaux montrent la variabilité de la composition de l'huile essentielle de menthe verte d'une région à une autre et d'un pays à un autre. Les composés majoritaires trouvés dans l'huile essentielle de *Mentha spicata* sont : le carvone, pulégone, pipéritone, 1,8-cinéole, limonène, limonène D, β -myrcène, Germacrène D, ménthone, iso-ménthone, cis-carvéol, acétate de terpinéol, oxyde de carvone, ...etc. Nous remarquons aussi que la menthe verte d'Algérie produit une huile essentielle possédant un grand pourcentage en carvone.

2.3.3.2 Paramètres influençant la composition et le rendement

Le Tableau 18 donne le rendement de l'extraction de l'huile essentielle de *Mentha spicata* par hydrodistillation trouvé par plusieurs auteurs :

Tableau 18: Variation du rendement en HE de *Mentha spicata* extraite par hydrodistillation en fonction de plusieurs paramètres

Pays	Région	Parties de la plante	Durée d'extraction (h)	Masse du végétal sèche (g)	Rendement en HE %	Référence
Algérie	Nord (Blida)	Feuilles et tiges	1,5	100	1,000	(Yahiaoui, 2005)
	Sud (Ouargla)			100	0,790	
	Tizi-Ouzou	Feuilles, fleurs, tiges	2	100 \pm 0,01	1,966 \pm 0,015	(Benazzouz et Hamdane, 2012)
	Bejaia	Feuilles	3	100	1,100	(Brahmi et al., 2016)
	Tizi-Ouzou	Feuilles	-	100	0,790	(Taleb-Toudert, 2015)
	Sétif	Feuilles, fleurs, tiges	3	100	0,870	(Boukhebt et al., 2011)
	Nord (Blida)	Feuilles et tiges	3	1000	0,900	(Benyoussef et al., 2004)
	Sud (Ouargla)	Feuilles et tiges		1000	1,000	
Tunisie	Nabeul	Feuilles, fleurs, tige	3	100	1,100	(Snoussi et al., 2015)
Pakistan	Chitral	Feuilles, fleurs, tige	3	-	1.200 \pm 0.100	(Hussain et al., 2010)
Ethiopie	-	Feuilles	3	-	0,800	(Mieso et Befu, 2020)
Algérie	Laghouat	Feuilles, fleurs, tige	4	200	0,915	(Bardaweel et al., 2018)

D'après ces résultats, nous constatons que le rendement en HE de menthe verte par hydrodistillation varie entre 0,7% et 2% environs. Une durée d'extraction de 3h par hydrodistillation est suffisante.

Tableau 19: Composition chimique de l'huile essentielle de menthe verte de plusieurs régions d'Algérie

	Pays	Algérie-Centre			Algérie-Est		Algérie-Sud	
	Région	Blida	Tizi-Ouzou	Tizi-Ouzou	Bejaia	Sétif	Laghouat	Ouargla
	Partie de la plante	Feuilles et tiges	-	Feuilles	Feuilles	Feuilles, fleurs, tiges	Feuilles, fleurs, tiges	Feuilles et tiges
	Méthode d'extraction	HD	HD	SD	HD	HD	HD	HD
	Durée d'extraction (h)	3	2	-	3	3	4	3
No.	Référence	(Benyoussef et al., 2004)	(Benazzouz et Hamdane, 2012)	(Taleb-Toudert, 2015)	(Brahmi et al., 2016)	(Boukhebt et al., 2011)	(Bardaweel et al., 2018)	(Benyoussef et al., 2004)
1	2-Héxanal	-	0,1	-	-	-	-	-
2	Tricyclène	-	0,06	-	-	-	-	-
3	4(10)-Thujène	0,3	-	-	-	-	-	-
4	α -Thujène	-	0,1	-	0,1	t	-	-
5	α -Pinène	-	0,88	1,44	1,1	0,322	0,7	-
6	Camphène	-	0,35	0,21	0,1	t	-	-
7	Sabinène	-	0,85	-	0,7	0,327	0,6	0,2
8	β -pinène	0,6	0,77	1,62	1,3	0,607	1,1	0,3
9	Oct-1èn-3-ol	-	t	-	-	0,125	-	-
10	Myrcène	-	-	-	0,8	0,379	0,8	-
11	β - Myrcène	-	5,38	1,84	-	-	-	0,6
12	Octan-3-ol	1,6	0,2	-	0	0,305	0,3	-
13	α -Terpinène	0,4	0,58	-	0,3	0,161	0,3	-
14	p-Cymène	-	-	0,15	-	-	0,2	-
15	o-Cymène	0,5	t	-	-	-	-	t
16	D Limonène	-	-	21,02	-	-	-	-
17	Limonène	0,5	12,96	-	20,8	6,129	16,1	4
18	1,8-Cinéole	8,2	-	5,63	5,4	3,8	8,7	4,3
19	β -Phellandrène	-	-	0,86	-	-	-	-
20	(Z)- β -Ocimène	-	0,47	-	0,6	0,331	0,3	-
21	Phényl acétaldehyde	0,3	-	-	-	-	-	-
22	(E)- β -Ocimène	-	0,13	-	0,1	0,118	0,1	-
23	γ - terpinène	-	1,07	-	0,6	0,36	0,4	-
24	Acétate de cis-Carvyl	0,5	-	-	0,2	0,613	0,3	t
25	p-Mentha3,4-diène	-	-	0,33	-	-	-	-
26	cis-Sabinène hydrate	0,2	2,8	-	0,2	0,975	0,8	t
27	trans-Sabinène hydrate	2,8	0,19	-	-	-	-	t

28	Terpinolène	0,1	0,28	-	0,2	0,098	0,2	-
29	Linalol	0,1	0,19	-	-	0,212	0,2	-
30	cis-p-Menth2-en-1-ol	-	-	-	-	-	0,2	-
31	Oxide de trans-limonène	-	0,03	-	-	-	-	-
32	Ménthone	-	0,08	-	-	-	-	-
33	Terpinène-4-ol (4-terpinéol)	1,5	2,54	-	1,5	1,12	1,5	-
34	α -Terpinéol	0,5	-	-	0,1	1,986	0,3	1,3
35	δ -Terpinéol	-	-	-	-	0,202	0,5	-
36	Bornéol	1	1,24	-	0,2	-	-	1,9
37	Endo-bornéol	-	-	-	-	0,484	-	-
38	p-Mentha-1,5-dien-8-ol	-	-	-	0,2	-	-	-
39	trans-dihydrocarvone	-	-	-	-	1,555	-	0,3
40	trans-hydrocarvone	-	-	3,09	-	-	-	-
41	cis-dihydrocarvone	0,7	0,55	-	0,6	-	3,9	3,4
42	Néo-iso-dihydro carvéol	-	-	-	-	0,221	-	-
43	Neo-dihydrocarvéol	-	-	4,05	1,3	-	-	-
44	Dihydrocarvéol	7,1	-	-	-	-	-	t
45	Verbénone	-	-	-	-	-	-	0,4
46	Bicyclogermacrène	-	0,1	-	0,8	0,722	0,7	-
47	γ -Cadinène	-	0,13	-	-	0,109	-	-
48	δ -Cadinène	-	-	-	0,2	0,271	0,2	-
49	cis-Cadina-1(6),4diène	-	-	-	0,3	-	-	-
50	trans-Carvéol	-	-	-	0,1	-	0,2	-
51	cis-Carvéol	-	-	-	0,9	1,176	-	-
52	Pulégone	-	-	0,23	0,6	0,224	0,5	-
53	Carvone	56,4	18	-	48,5	59,4	49,5	79,9
54	Acétate de dihydro carvéol	0,8	1,05	-	-	-	-	-
55	Acétate de dihydro iso carvéol	-	-	-	-	0,374	0,6	-
56	Pipériténone	-	-	-	-	0,147	-	-
57	β -Bourbonène	1,9	0,34	2	1,4	2,796	-	0,4
58	γ -Eléméne	1	-	-	-	-	-	-
59	β -Eléméne	-	0,07	-	0,4	0,838	0,3	-
60	(Z)-Jasmone	0,8	0,07	-	0,3	0,632	0,3	0,1
61	trans- β -Caryophyllène	-	1,18	-	-	-	-	-
62	β -Caryophyllène	3,2	-	1,2	3,4	2,969	2,7	1,4

63	β -Copaène	-	-	-	0,1	0,347	0,2	-
64	(E)- β -farnésène	-	t	-	-	0,542	-	t
65	α -humulène	t	0,18	-	0,1	0,187	0,2	t
66	Muorola-4(14),5-iène (cis)	-	-	-	0,1	-	0,3	-
67	γ -muurolène	-	-	-	-	0,258	-	-
68	Germacrène-A	1	-	-	-	-	0,7	-
69	Germacrène-D	4,6	0,89	0,21	3,4	4,665	2,1	-
70	Prémnaspirodiène	-	-	-	0,7	-	-	-
71	cis-Calaménène	-	0,14	-	-	0,152	-	-
72	trans-Calaménène	-	-	-	0,1	-	-	-
73	Spathuléol	0,2	-	0,32	0,3	0,664	0,2	-
74	Oxyde de caryophyllène	0,3	t	-	0,3	0,649	0,3	t
75	α -Cadinol	t	0,1	-	-	0,47	-	t
76	Cubéol (1,10-di-epi)	-	-	-	0,2	-	0,2	-
77	Shyobunol	-	-	-	0,1	-	-	-
78	terpinène-1-ol	-	0,12	-	-	-	-	-
79	α -epi-cadinol	-	0,57	-	0,2	-	-	-
80	T-Muurolol	-	-	-	-	-	0,2	-
81	p-menth-8-en-2-ol	-	0,21	-	-	-	-	-
82	Acétate de bornyl	-	0,28	0,31	-	-	-	-
83	Acétate de trans-carvyl	0,1	0,05	-	-	-	-	-
84	Bicyclo sésquiphellandrène	-	0,22	-	-	-	-	-
85	Aromadendrène	-	-	0,49	-	-	0,1	-
86	n-nonanal	t	-	-	-	-	0,1	-
87	cis-3-hexenyl isovalérate	0,3	-	-	-	-	0,9	-
88	Hexyl isovalérate	0,2	-	-	-	-	-	-
89	Acétate de α -fenchyl	0,2	-	-	-	-	-	-
90	Dihydroédulan II A	0,1	-	-	-	-	-	-
91	Dihydroédulan I A	0,1	-	-	-	-	0,1	-
92	Eugéol	0,2	-	-	-	-	-	-
93	tau-Cadinol	-	-	-	-	-	0,3	1,2
94	Acide oléique	1,1	-	-	-	-	-	-
	Total composés identifiés	99,4	55,5	45	98,9	98,022	98,4	99,7

t : Traces

Tableau 20: Composition chimique de l'huile essentielle de menthe verte de différents pays

	Pays	Tunisie	Grèce	Turquie	Iran	Pakistan	Inde	Chine	Brésil
	Méthode d'extraction	HD	HD	HD	HD	HD	HD	HD	SD
	Durée d'extraction (h)	3	-	2	2	3	5	4	1,5
No.	Référence	(Snoussi et al., 2015)	(Koliopoulos et al., 2010)	(Telci et al., 2010)	(Zeinali et al., 2005)	(Hussain et al., 2010)	(Joshi, 2013)	(Zhao et al., 2013)	(Gonçalves et al., 2009)
1	Tricyclène	-	-	-	0,1 - 1,3	-	-	-	-
2	α -Thujène	-	0 - t	-	-	-	0,2	-	-
3	α -Pinène	1,4 \pm 0,17	0,91 - 1,8	0,17 - 0,64	-	-	0,1	0 - 0,1	1,03
4	Camphène	0,2 \pm 0,06	t - 0,04	0,71 - 0,88	0,4 - 1,7	-	-	-	-
5	Sabinène	1,4 \pm 0,06	0 - 1,15	-	0,7 - 5	-	0,2	-	0,84
6	β -pinène	2,2 \pm 0,25	0,09 - 2,6	0,57 - 1,05	-	-	0,3	-	1,81
7	Oct-1èn-3-ol	-	t - 0,08	-	-	-	-	-	-
8	Myrcène	1,1 \pm 0,15	0,84 - 1,3	0,43 - 0,79	-	-	0,5	-	1,86
9	Octan-3-ol	1,0 \pm 0,21	0 - 2,6	0,97 - 1,01	-	-	0,6	0 - 0,3	-
10	α -Terpinène	-	t - 0,45	-	-	-	0,1	-	-
11	p-Cymène	0,8 \pm 0,06	0 - t	-	0 - 48,9	-	-	-	-
12	o-Cymène	-	-	-	-	-	0,1	-	-
13	Limonène	20,8 \pm 1,12	0 - 5,07	3,20 - 5,21	-	5,3 \pm 1,0	0,7	0,3 - 2,5	3,18
14	1,8-Cinéole	17,0 \pm 0,60	5,42 - 14,5	4,30 - 7,76	0 - 14,8	4,0 \pm 0,1	1,6	0,2 - 0,9	9,23
15	β -Phellandrène	-	0 - 0,07	1,31 - 2,95	-	-	-	-	-
16	Iso-Menthone	-	-	-	0,1 - 39,1	-	2,6	0 - 1,5	-
17	Menthofuran	-	-	-	0 - 2,7	-	-	-	-
18	(Z)- β -Ocimène	0,2 \pm 0,06	0 - 0,14	0 - 0,55	-	-	t	-	-
19	(E)- β -Ocimène	-	0 - 0,03	0 - 0,31	-	-	-	-	-
20	γ -terpinène	-	t - 0,04	0 - 0,29	-	t	0,4	-	-
21	Carvacrol	-	-	-	0 - 49,6	-	-	-	-
22	Acétate de carvéol	-	-	-	-	-	-	0 - 1,4	-
23	Acétate de trans-Carvyl	-	0 - 0,24	-	0 - 32,2	-	-	-	-
24	Acétate de Terpinén-4-yl	-	-	-	0 - 55,3	-	-	-	-
25	p-Mentha-3,8-diène	-	-	-	-	-	0,1	-	-
26	p-Mentha-2,4 (8) diène	-	-	-	-	-	0,2	-	-
27	Sabinène hydrate	-	-	0,78 - 2,77	-	-	-	-	-
28	cis-Sabinène hydrate	1,6 \pm 0,15	0 - 0,38	-	-	1,0 \pm 0,0	-	-	-
29	trans-Sabinène hydrate	-	0 - 0,53	-	-	-	-	-	-

30	p-Cymènène	-	0 - 1,5	0 - 0,34	-	-	-	-	-
31	Linalol	0,4 ± 0,12	0,06 - 1,1	-	-	t	0,4	0,3 - 6,9	-
32	Iso-Pulégol	-	-	-	-	-	-	0 - 0,2	-
33	cis-p-Menth2-en-1-ol	0,1 ± 0,00	-	-	-	-	0,1	-	-
34	trans-Sabinol	-	-	-	-	-	0,1	-	-
35	p-Menth-3-en-8-ol	-	-	-	-	-	0,1	-	-
36	Oxide de cis-limonène	0,1 ± 0,06	-	-	-	-	-	-	-
37	Oxide de trans-limonène	0,1 ± 0,00	-	-	-	-	-	-	-
38	Ménthone	-	-	-	-	0,9 ± 0,0	15,6	1,5 - 6,9	7,89
39	3-Thujanol	-	-	-	-	-	1,8	-	-
40	trans- Isopulégone	-	-	-	-	-	-	-	0,86
41	cis- Isopulégone	-	-	-	-	-	-	-	0,24
42	Iso-pulégone	-	-	-	-	-	-	0 - 1,6	-
43	Carvénone	-	-	-	-	-	0,2	-	-
44	Terpinéne-4-ol (4-terpinéol)	1,3 ± 0,26	0 - 0,6	0,40 - 1,67	-	0,8 ± 0,0	-	-	-
45	Acétate de dihydro-Linalool	-	-	-	-	-	0,3	-	-
46	α-Terpinéol	0,5 ± 0,10	0 - 0,83	0,15 - 1,02	-	0,5 ± 0,0	-	0 - 0,5	-
47	δ-Terpinéol	0,4 ± 0,12	-	-	-	-	-	-	-
48	Bornéol	0,1 ± 0,06	0 - 0,83	-	-	-	-	-	-
49	Dihydrocarvone	-	-	-	-	-	-	0,5 - 2,5	-
50	trans-dihydrocarvone	-	0 - 0,12	-	-	0,8 ± 0,0	-	-	-
51	cis-dihydrocarvone	1,9 ± 0,49	0 - 4,9	-	-	2,2 ± 0,1	-	-	-
52	Néo-iso-dihydro carvéol	-	0 - 2,11	-	-	-	-	-	-
53	Neo-dihydrocarvéol	-	0 - 0,18	-	-	-	-	-	-
54	Dihydrocarvéol	1,7 ± 0,31	0 - 6,27	-	-	-	-	0,8 - 15,7	-
55	γ-Cadinène	-	0 - 1,1	-	-	-	-	-	-
56	δ-Cadinène	-	-	0,25 - 0,46	-	-	-	-	-
57	Carvéol	-	-	-	-	-	-	0,2 - 2,3	-
58	trans-Carvéol	0,4 ± 0,06	0 - 0,68	-	-	0,7 ± 0,0	-	-	-
59	cis-Carvéol	0,6 ± 0,15	0 - 3,9	-	0 - 10,6	24,3 ± 0,7	-	-	-
60	α-Cadinène	-	0 - 0,7	-	-	-	-	-	-
61	Pulégone	0,3 ± 0,06	0 - 2,2	26,71 - 29,56	-	-	72,1	1,4 - 7,9	55,49
62	Carvone	40,8 ± 1,23	t - 59,12	0,55 - 1,06	-	51,7 ± 1,5	-	46,7 - 65,4	-
63	Acétate de Linalool	-	-	-	-	-	-	0 - 2,1	-
64	Pipéritone	-	0 - 1	22,17 - 28,16	0 - 49,3	-	-	0 - 0,4	-
65	Iso-Pipéritone	-	-	0,12 - 0,48	-	-	-	-	-

66	Oxide de Pipéritone	-	-	-	0 - 23,3	-	-	0 - 0,3	-
67	Acétate de Nérolidol	-	-	-	-	-	-	0 - 0,8	-
68	Acétate de Menthyl	-	-	-	-	-	-	0 - 0,3	-
69	Dehydroédulan II	-	0 - 4,4	-	-	-	-	-	-
70	Oxide de Pipériténone	-	0 - 35,7	-	-	-	-	-	4,48
71	Acétate de dihydro carvéol	-	0 - 0,19	-	-	-	-	0 - 7	-
72	Acétate de dihydro iso carvéol	0,2 ± 0,06	-	-	-	-	-	-	-
73	Acétate de Neo iso-dihydrocarvyl	-	0 - 0,9	-	-	-	-	-	-
74	Pipériténone	-	-	-	-	-	-	0,3 - 0,8	-
75	4-Methyl-isopulégone	-	-	-	-	-	-	0 - 1,3	-
76	β-Bourbonène	0,9 ± 0,17	-	0,08 - 0,30	-	-	-	0,5 - 1,6	-
77	β-Elémène	0,3 ± 0,06	-	-	-	-	-	-	-
78	(Z)-Jasmone	-	0 - 0,16	-	-	-	-	-	-
79	trans-β-Caryophyllène	-	-	5,23 - 8,01	-	-	-	-	-
80	β-Caryophyllène	1,2 ± 0,25	0,9 - 1,8	-	-	1,2 ± 0,0	-	0,7 - 1,8	-
81	α-Copaène	-	-	0,26 - 0,37	-	-	-	-	-
82	β-Copaène	-	0 - t	-	-	-	-	-	-
83	(E)- β-farnésène	-	-	-	-	-	-	0 - 0,7	-
84	β-Cubébène	-	-	0 - 0,15	-	-	-	1,2 - 3,2	-
85	Elixène	-	-	0,06 - 0,86	-	-	-	0 - 0,4	-
86	α-humulène	-	0 - t	0,10 - 0,28	-	-	-	-	-
87	Muuorola-4(14),5-iène (cis)	-	0 - 0,8	-	-	-	-	-	-
88	Germacrène-A	0,2 ± 0,15	-	-	-	-	-	-	-
89	Germacrène-D	0,2 ± 0,06	t - 1,76	3,08 - 5,32	-	1,5 ± 0,1	-	-	-
90	trans-Calaménène	-	0 - 6,4	-	-	-	-	-	-
91	Spathulénol	0,1 ± 0,00	0 - 5,2	-	-	-	-	-	-
92	Oxyde de caryophyllène	0,3 ± 0,06	-	0,67 - 3,03	-	0,6 ± 0,0	-	-	-
93	α-Cadinol	-	0 - 2,1	0 - 0,98	-	-	-	-	-
94	Viridiflorol	-	0 - 4,3	-	-	-	-	-	-
95	Humulène epoxide II	-	0 - 0,9	-	-	-	-	-	-
96	Cubénol (1,10-di-epi)	-	0 - 3,3	-	-	-	-	-	-
97	Menthol	-	-	0 - 0,08	0 - 15,7	0,4 ± 0,0	-	2 - 8,7	-
98	Acétate d'isobornyl	0,1 ± 0,00	-	-	-	-	-	-	-
99	Acétate de trans-carvyl	-	-	-	-	2,1 ± 0,1	-	-	-
100	Oxide de Carvone	-	-	-	0 - 52,5	-	-	-	-

t : Trace

2.3.3.2.1 Paramètres intrinsèques

- Période de récolte

Selon les expériences de Kizil et Toçer (Kizil et Tonçer, 2006), la période de récolte influe sur la composition de l'huile essentielle. Le rendement est maximal en pleine floraison et les huiles riches en carvone et p-cymène sont celles récoltées avant floraison, alors que la teneur en 1,8-cinéole augmente pendant et après floraison.

2.3.4 *Pimpinella anisum* L. (Anis vert)

2.3.4.1 Composition chimique

Les tableaux 21 et 22 montrent la composition chimique de l'huile essentielle de *Pimpinella anisum*, à partir d'études antérieures, de différentes parties de la plante obtenue par analyse chimique par chromatographie en phase gazeuse (CG) avec spectrométrie de masse (CG-SM)

Les principaux composés de *Pimpinella anisum* d'après les 2 tableaux sont : Trans-anéthole, Méthyl chavicol, Estragol, p-anisaldehyde, γ -himachalene, méthylbutyrate, Anisaldehyde, Limonène.

Tableau 21 : Composition chimique de l'huile essentielle d'anis d'Algérie

Origine	Boussada		-
Matière Végétale	Graines sèches		Graines sèches
Procédé	HD	MAHD	HD
Référence	(Boumahdi et al., 2020)		(Saibi, 2012)
Composé			
linalool	0.14	-	0.29
Méthyl chavicol	1.39	0.63	-
Estragol	-	-	1.92
Cis-anethole	0.34	0.23	0.45
α -himachalene	-	0.16	-
γ -himachalene	0.36	0.5	1.11
Anisylacetone	-	-	0.27
o-isoougénol	-	-	1.85
Tans-Pseudoisoeugenyl 2- methylbutyrate	2.53	6.53	--
Butanoic acid, 2-methyl-, 4-methoxy-2- (3-methyloxiranyl) phenyl ester	-	-	0.30
γ -terpinene	-	0.08	-
fenchone	-	0.41	-
p-anisaldehyde	1.57	1.1	-
Trans-anethole	91.31	81.52	92.4
anisyl methyl ketone	0.13	0.28	-
trans-isolongifolanone	0.17	0.31	-
epoxy-pseudoisoeugenyl 2-methylbutyrate	0.56	2.01	-
α -curcumene	0.08	-	-
α -Zingiberene	0.06	0.1	0.25
β -thujaplicin	0.07	-	-
trans-p-methoxy-cinnamaldehyde	0.27	0.2	-
cis-jasmolacatone extra C	-	0.41	-
Benzeneaceticacid 3-methylphenylester	0.24	0.28	-
limonene	-	0.68	-
Total	99,22	95,43	98.8

Tableau 22 : Composition chimique de l'huile essentielle d'anis de différents pays

Origine	Oman	Yémen	Inde	Serbie	Brésil	Iraq	France	Écosse	Lituanie	Espagne	Tchèque	Estonie
Matière Végétale	-	Graine sèches	Graines sèches	Fruits mûrs écrasés	-	Graines sèches	Fruits secs	Fruits secs	Fruits secs	Fruits secs	Fruits secs	Fruits secs
Procédé	HD	HD	HD	HD	HD	HD	HD	HD	HD	HD	HD	HD
Référence	(Albu et al, 2014)	(AL Maofari. et al., 2013)	(Singh. et al., 2008)	(Aćimović et al., 2014)	(Vieira. et al., 2019)	(Al-Wendawi et al., 2021)	(Orav et al., 2007)					
α -pinene	-	-	0.1	0	-	-	-	-	-	-	-	-
limonene	-	5.53	0.8	0	0.18	-	-	-	-	-	-	-
Estragol	-	85.28	2.3	0.19	-	3.01	1.5	1.9	2.0	1.4	0.9	0.6
cis-Anetohole	-	-	0.5	trace	-	-	-	-	-	-	-	-
trans-Anetohole	55.491	3.54	90.1	96.80	94.01	-	76.9	93.6	93.0	87.9	88.4	78.1
γ -himachalene	-	-	-	1.84	-	-	3.1	1.4	1.5	2.3	0.7	8.2
β -Himachalene	-	-	-	0.11	-	-	-	-	-	-	-	-
p-anisaldehyde	4.769	-	0.5	-	-	-	5.4	0.7	0.7	2.2	3.1	0.1
α -himachalene	-	-	-	0.13	-	-	-	-	-	-	-	-
cis-dihydrocarvone	-	-	-	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-
trans-pseudoisoeugenyl 2-methylbutyrate	-	-	-	0.32	-	-	5.7	0.4	0.7	2.3	2.9	6.4
Tetrachloroethylene	4.179	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2-heptanal (Z and E)	2.483	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2,4-decadienal	11.353	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,5,5,9-tetramethyl (1H) benzocycloheptene	2.028	-	-	-	-	0.74	-	-	-	-	-	-
2-(1-propenyl)-4-methoxyphenyl	3.098	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,2-cyclohexanedimethanamine	1.234	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Anisole	-	-	-	-	-	87.99	-	-	-	-	-	-
p-cymene	-	-	0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Camphor	-	-	0.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>endo</i> -fenchyl acetate	-	-	0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,8-cineole	-	-	0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
fenchone	-	4.12	5.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4-methoxy-2-(3-methyloxiranyl)phenyl ester	1.545	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	86.18	96.47	99.8	99.65	94.19	91.74	92.6	98	97.9	96.1	96	93.4

Tableau 23: Composition chimique de l'huile essentielle d'anis de différents pays (suite)

Origine	Tunisie	Portugal	Bangladesh	Italie	Egypte		Allemagne	Hongrie	Russie	Maroc	Turquie	Soudan	Grèce	Syrie
Procédé	HD	HD	HD	HD	HD	SD	HD	HD	HD	HD	HD	HD	HD	HD
Référence	(Bettaieb et al., 2017)	(Smith, 2002)	(Shamsun et al., 2012)	(Orav et al., 2007 ; Iannarelli et al., 2018)	(Bettaieb et al., 2017; El-Rokiek et al., 2020 ; Mohammed et al., 2019)	(Mohammed et al., 2019)	(Orav et al., 2007 ; Yan et al., 2011 ; Ullah et al., 2013)	(Yamini et al., 2006 ; Orav et al., 2007)	(Orav et al., 2007)	(Ghouati et al., 2012 ; AL Maofari et al., 2013)	(Malayoglu-Basmacioglu et al., 2011 ; Arslan et al., 2004 ; Hategekimana et Erler, 2020 ; Özcan et Chalchat, 2006)	(Hassan et Elhassan., 2016)	(Orav et al., 2007)	(Khubeiz et Bahera, 2020)
Composé	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
α -pinene	-	-	0-0.943	-	(0-0.06)	-	-	-	-	-	(0-0.01)	-	-	-
sabinene	-	-	-	-	(0-0.03)	-	-	-	-	-	(0-0.05)	-	-	-
β -pinene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0-0.04)	-	-	-
myrcene	-	-	-	-	0-0.02	-	-	-	-	-	(0-0.04)	-	-	-
α -terpinene	0.06±0.01	-	-	-	(0-0.02)	-	-	-	-	-	(0-0.01)	-	-	-
limonene	-	-	-	-	(0.03-0.97)	0.10	-	-	-	(0-9.75)	-	-	-	-
γ - terpinene	-	-	-	-	(0-0.03)	-	-	-	-	-	(0-0.05)	-	-	-
terpinen-4-ol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0-1.93)	-	-	-
δ -elemene	-	-	-	-	-	-	(0.2-0.45)	-	-	-	-	0.16	-	-
methyl eugenol	-	-	-	-	(0-0.03)	-	-	-	-	-	(0-2.44)	-	-	-
g-murolene	-	-	-	-	-	-	-	(0-1.1)	-	-	-	-	-	-
β -bisabolene	0.19±0.02	-	-	-	(0-0.85)	-	(0.38-0.6)	(0-0.1)	-	-	(0-0.1)	0.27	-	-
elemicin	-	-	-	-	(0-0.03)	4.26	-	-	-	-	-	-	-	-
germacrene B	-	-	-	-	(0-0.02)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
spathulenol	-	-	-	-	-	-	(0.04-0.3)	-	-	-	-	0.31	-	-
Estragol	0.20 ± 0.03	2.2	-	(1.3-1.7)	(3.74 -10.83)	-	(0.33-0.8)	(0- 1.9)	-	(0-76.70)	(0-2.4)	1.86	-	0.29
cis-Anetohole	-	Tr	(69.404-85.321)	(0-0.1)	(0.04-1.47)	0.99	(0.14-0.3)	-	-	(0-0,59)	(0-2.08)	-	-	-

trans-Anetohole	94.30±0.01	92.5	0-1.977	(92.2-97.9)	(65.56-98.97)	33.77	(82.1-88.9)	(91.3-92.8)	(85.1-87.7)	(0-81,19)	(78.63-95.40)	78.50	90.2	96.11
γ-himachalene	2.32 ± 0.04	-	-	(0.3 -2.2)	(0.04-1.08)	0.44	(1.4-7.0)	(0-3.9)	(2.5- 5.6)	(0-6,22)	(0-1.1)	-	2.6	1.83
β-Himachalene	0.12±0.02	-	-	-	(0-0.11)	-	(0-0.44)	-	-	-	-	0.12	-	-
α-Longipinene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0-0,36)	-	-	-	-
α-zingiberene	-	-	-	-	-	-	(0.6-0.77)	(0-1.2)	-	-	(0-0.2)	-	-	0.53
α -Cadinol	-	-	-	-	-	-	(0-0.08)	-	-	-	-	-	-	0.33
p-anisaldehyde	0.17 ± 0.01	-	-	(0-tr)	(0.10 -0.14)	-	(tr-0.8)	(0.2-0.4)	(0.6- 1.8)	-	(0-0.1)	-	2.8	-
(E)-methyleugenol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0-0.1)	-	-	-
α-himachalene	-	-	-	-	-	-	(0.7-0.71)	-	-	-	(0-0.1)	-	-	-
α-cuparene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0-0.1)	-	-	-
β-elemene	0.07 ± 0.66	-	-	-	(0.03-0.09)	0.70	(0.08-0.2)	-	-	-	-	0.1	-	-
methyl chavicol	-	-	-	-	(0-0.10)	0.93	(0.8-2.0)	(0-0.5)	(0.5-1.5)	-	(0-2.67)	-	1.3	-
α -phellandrene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0-0.06)	-	-	-
cis-dihydrocarvone	-	-	-	-	(0-0.06)	0.17	-	-	-	-	-	-	-	-
camphene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0-tr)	(0-0.02)	-	-	-
trans-pseudoisoeugenyl 2-methylbutyrate	-	0.1	-	(tr- 1.5)	-	-	(0-1.4)	(0-1.0)	(1.7-2.0)	-	-	-	0.9	-
Anisaldehyde	-	1.9	-	-	-	-	-	-	-	-	(0-5.76)	-	-	-
Linalool	0.13± 0.01	-	-	-	(0.04-3.29)	-	-	-	-	-	(0-2.65)	-	-	-
Zingiberene	0.30± 0.03	-	-	-	(0-0.25)	-	-	-	-	-	-	1.06	-	-
α -terpineol	-	-	-	-	(0-0.02)	-	-	-	-	-	(0-3.94)	-	-	-
Anisyl alcohol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0-0.27)	-	-	-
α-chamigrene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0-0,48)	-	-	-	-
aromadendrene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0-0,07)	-	-	-	-
quercetol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0-0,09)	-	-	-	-
α-Amorphane	-	-	-	-	-	-	(0-0.15)	-	-	-	-	-	-	-
(E)-Methylisoeugenol	-	-	-	-	-	-	(0-0.14)	-	-	-	-	-	-	-
α-Muurolene	-	-	-	-	-	-	(0.15-0.3)	-	-	-	-	-	-	-
β-Sesquiphellandrene	-	-	-	-	-	-	(0-0.05)	-	-	-	-	-	-	-
Anisole	0.97±0.05	-	-	-	(0-0.52)	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Cis-Isoeugenol	0.14±0.01	-	-	-	(0-0.22)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Isolongifolene	0.04±0.00	-	-	-	(0-0.02)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Diepi- α -cedrene	0.91±0.02	-	-	-	(0-0.08)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
α -fimachalene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.28	-	-
Longifolene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.64	-	-
Cadinol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.71	-	-
Pentadecanoic acid	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.35	-	-
Methyl butyrate	-	-	-	-	(0-0.03)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Propyl butyrate	-	-	-	-	(0-3.01)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Isopentyl, N-butyrate	-	-	-	-	(0-3.69)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Myrtenal	-	-	-	-	(0-0.03)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Germacrene D	-	-	-	-	(0-0.03)	-	-	(0-0.8)	-	-	-	-	-	-
Cuparene	-	-	-	-	(0-0.02)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Eugenyl acetate	-	-	-	-	(0-3.41)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E-Nuciferol	-	-	-	-	(0-0.31)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
β -Phellandrene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0-0.02)	-	-	-
<i>p</i> -cymene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0-1.51)	-	-	-
cis-Ocimene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0-0.02)	-	-	-
trans-Ocimene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0-0.03)	-	-	-
Terpinolene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0-0.14)	-	-	-
Camphor	-	-	-	-	(0-0.03)	0.37	-	-	-	-	-	-	-	-
Cyclosativen	-	-	-	-	-	-	(0-0.2)	-	-	-	-	-	-	-
1,8-cineole	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0-0.08)	-	-	-
fenchone	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0-6.16)	-	-	-	-
Anisic acid	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0-0.67)	-	-	-
linalyl acetate	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0-0.01)	-	-	-
isoeugenol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0-0.91)	-	-	-
acetoanisole	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0-1.97)	-	-	-
D - 3-carene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0-0.04)	-	-	-
Himachalene	-	-	-	-	(0-0.04)	0.29	-	-	-	-	-	-	-	-
Eugenol	-	-	-	-	(0-0.48)	2.48	-	-	-	-	(0-0.81)	-	-	-

Carvone	-	-	-	-	(0-0.06)	33.99	-	-	-	-	-	-	-	-
Nerodiol	-	-	-	-	(0-0.03)	11.37	-	-	-	-	-	-	-	-
Apiol	-	-	-	-	(0-0.03)	0.21	-	-	-	-	(0-0.44)	-	-	-
D-Limonene	-	-	0-13.273	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1R-alpha-pinene	-	-	(0.873-0.946)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Eucalyptol	-	-	(0.30-0.447)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bycyclo[2,2,1]heptan-2-one,1,3,3-trimethyl,	-	-	(5.440-11.413)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,3,8-p-menthatriene	-	-	0-0.462	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,3,6-Octatriene,3,7-dimethyl-, (E)	-	-	0-0.414	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hexaborane	-	-	0-0.150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Benzene,1methyl-3-(1-methylethyl)-	-	-	0-1.447	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cyclobutane,1,2-bis(1-methylethyl)	-	-	0-6.492	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Humulene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0-0.18)	-	-	-
Nerol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0-0.08)	-	-	-
L-pinene	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0-0.02)	-	-	-
L-limonen	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0-5.89)	-	-	-
L-fenchone	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(0-0.35)	-	-	-
Di-epi-alpha-cedrene	-	-	-	(0-0.24)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(+)-Carvone	-	-	-	(0-0.29)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Estragole <i>cis</i> -anethole	-	-	-	(0-2.46)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>cis</i> -(-)-2,4a,5,6,9a-Hexahydro-3,5,5,9- <i>cis</i> -anethole	-	-	-	(0-1.7)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
β-Chamigrene	-	-	-	(0-0.13)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
p-Cumic aldehyde	-	-	-	(0-0.16)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
tetramethyl(1H)benzocycloheptene	-	-	-	(0-0.83)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

2.3.4.2 Paramètres influençant la composition et le rendement

2.3.4.2.1 Paramètres intrinsèques

- Période de cueillette

Özel et coll. (Özel et al., 2009) ont étudié les effets de la récolte sur le rendement et la composition en huile essentielle d'anis Turc récolté à différents stades de maturation des plantes durant la période de végétation 2002 et 2003 et ont conclu que le quatrième stade de récolte où l'ombelle principale était complètement mûrie était considéré comme le stade de récolte le plus approprié pour l'anis car les rendements les plus élevés de graines, d'huiles essentielles et (E) - anéthol ont été obtenu à partir de ce stade. De plus, la qualité de l'huile essentielle était élevée au premier (début du stade cireux) et au deuxième stade (changements de couleur dans la tige principale) de récolte. Par conséquent, ils ont trouvé que pour améliorer les rendements, il convient d'identifier des génotypes qui se ramifient faiblement ou forment des ombelles simples, ainsi que des techniques de culture appropriées (Özel et al., 2009).

- Stockage durée, mode et lumière

L'huile essentielle contenue dans les graines d'anis vert est toxique à haute dose, et la teneur en cette huile diminue rapidement au cours du stockage (0.1% par mois). Le fruit doit être conservé dans un récipient bien fermé et à l'abri de la lumière (Chaumeton, 1981).

- Nature et état de la matière végétale

Les résultats du tableau 24 montrent que le rendement d'études antérieures en huile essentielle de *Pimpinella anisum* obtenue par hydrodistillation est influencé par la nature de la matière végétale.

Pour une durée d'extraction fixée à 3 heures, les rendements les plus élevés sont obtenus dans le cas d'utilisation des fruits secs du Maroc sous divers états : après broyage au moulin électrique 3.55%, après concassage au mortier 3.1% et entiers 3% ce qui montre que le rendement dépend du traitement appliqué aux fruits ; de plus, l'utilisation des graines Iraquiennes permet aussi d'obtenir un rendement relativement élevé 2.8%.

2.3.4.2.2 Paramètres opératoires

Les tableaux 25 et 26 rassemblent les rendements d'études antérieures obtenus pour différentes durées d'extraction des HE des graines et des fruits d'anis. On trouve dans la littérature, que la durée d'extraction par hydrodistillation varie entre 2 et 6 heures.

- L'utilisation des graines d'anis Algérien permet d'obtenir un rendement maximal de **(3.30 ± 0.05) %** avec une durée d'extraction de 5h30min. Et pour les fruits le rendement maximal était de 3.55% (Maroc) pour une durée seulement de 3 heures.

Tableau 24: Influence de la nature et l'état du matériel végétal sur le rendement en huile essentielle de *Pimpinella anisum* obtenue par hydrodistillation

Origine	Région	Matière Végétale	Rendement(%)	Référence
Egypte	-	Graines	0,673	(Mohammed et al., 2019)
Egypte	Assiut	Graines sèches	1,15	(El-Rokiek et al., 2020)
Turquie	-	Fruits moulus	2,49	(Husnu et al., 2007)
Turquie	Burdur	Graines sèches	1,91	(Özcan et al., 2006)
Maroc	El Hajeb	Fruits broyés(au moulin électrique) secs	3,55	(Ghouati et al., 2012)
Maroc		Fruits concassés (au mortier) secs	3,1	
Maroc		Fruits entiers secs	3	
Syrie	Marché local	Graines	2,39	(Khubeiz et Bahera, 2020)
Iraq	-	Graines	2,8	(Al-Hilphy et al., 2015)
	Marché local	Graines sèches	2	(Al-Wendawi, 2021)

Tableau 25: Influence de la durée d'extraction par hydrodistillation sur le rendement en huile essentielle des graines de *Pimpinella anisum*

Origine	Région	Durée d'extraction	Rendement (%)	Référence
Algérie	Boussada	5h30min	3,30 ±0,05	(Boumahdi et al., 2020)
Algérie	Pas mentionné	6h	2,35	(Saibi, 2012)
Egypte	Pas mentionné	3 h	0,673	(Mohammed et al., 2019)
Egypte	Assiut	3h	1,15	(El-Rokiek et al., 2020)
Turquie	Marché local	4 h	0,6	(Hategekimana et Erler, 2020)
Turquie	Burdur	3h	1,91	(Özcan et al., 2006)
Inde	Gorakhpur	5h	2,4	(Singh et al., 2008)
Syrie	Marché local	3h	2,39	(Khubeiz et Bahera, 2020)
Iraq	Pas mentionné	3h	2,8	(Al-Hilphy et al., 2015)
Iraq	Marché local	3h	2	(Al-Wendawi, 2021)

Tableau 26: Influence de la durée d'extraction par hydrodistillation sur le rendement en huile essentielle des fruits de *Pimpinella anisum*.

Origine	Région	Durée d'extraction	Rendement(%)	Référence
Tunisie	Korba	4h	2,17	(Bettaieb et al., 2017)
Egypte	Importé		1,75	
Turquie	-	3h	2,49	(Husnu et al., 2007)
Maroc	El Hajeb	3h	3,55	(Ghouati et al., 2012)
Maroc			3,1	
Maroc			3	
Italie	Ascoli Piceno	2h	2	(Iannarellia et al., 2018)
Soudan	Nile Province	4 h	2,73	(Hassan et Elhassan., 2016)

- Procédé

D’après le tableau 27, nous remarquons que l’hydrodistillation assistée par micro-ondes permet d’obtenir des rendements élevés avec des durées d’extraction courtes (**3.7%** pour une durée de **44 min** dans le cas des graines Iraquiennes et (**2.81 ± 0.01**) % pour une durée de **1 h30 min** dans le cas des graines Algériennes) comparées à celle obtenue par hydrodistillation ((**3.30 ±0.05**)% pour une durée de **5h30 min** dans le cas des graines Algériennes) et par entrainement à la vapeur (**2.5%** pour une durée de **2h30 min** dans le cas des graines Tunisiennes).

Tableau 27: Influence du type de procédé sur la durée d’extraction et le rendement en huile essentielle des graines de *Pimpinella anisum*

Origine	Région	Procédé	Durée d'extraction	Rendement(%)	Référence
Algérie	Boussada	MAHD	1h 30min	2,81 ± 0,01	(Boumahdi et al., 2020)
		HD	5h 30min	3,30 ±0,05	
	-	-	6h	2,35	(Saibi, 2012)
Tunisie	-	SD	2h 30min	2,5	(Romdhane et al., 2001)
Egypte	-	HD	3 h	0,673	(Mohammed et al., 2019)
Egypte		SD		0,763	
Egypte	Assiut	HD	3h	1,15	(El-Rokiek et al., 2020)
Turquie	Marché local	HD	4 h	0,6	(Hategekimana et Erler, 2020)
Turquie	Burdur	HD	3h	1,91	(Özcan,et al., 2006)
Inde	Gorakhpur	HD	5h	2,4	(Singh. et al., 2008)
Syrie	Marché local	HD	3h	2,39	(Khubeiz et Bahera, 2020)
Iraq	-	HD	3h	2,8	(Al-Hilphy et al., 2015)
		MAHD	44min	3,7	
	Marché local	HD	3h	2	(Al-Wendawi, 2021)

SD : Entrainement à la vapeur HD : Hydrodistillation MAHD : Hydrodistillation assistée par micro-ondes

2.4 Cinétique d’extraction

2.4.1 *Rosmarinus officinalis* L. (Romarin)

2.4.1.1 Cinétique globale

L’extraction de l’huile essentielle du romarin Algérien (de la région des Bibans) a été réalisée par Boutekedjiret (Boutekedjiret, 1999) par la méthode d’entrainement à la vapeur d’eau et hydrodistillation sous les mêmes conditions opératoires. Une masse M=50g de matière végétale à taux d’humidité H=20% a été traitée à échelle laboratoire pendant deux heures. Le débit du distillat était de 4,5 ml/min. Les résultats sont donnés dans les Tableau 28 et 29 :

Tableau 28: Cinétique d'extraction de l'HE de romarin par entrainement à la vapeur d'eau (Boutekedjiret, 1999)

Temps (min)	M _{HE(r)} (g)	M _{HE(s)} (g)	R _{HE} (%) (SD)
0	0	0,480	0,000
5	0,312	0,168	0,780
10	0,104	0,064	1,040
15	0,024	0,040	1,100
20	0,012	0,028	1,130
25	0,004	0,024	1,140
30	0,004	0,020	1,150
45	0,008	0,012	1,170
60	0,004	0,008	1,180
90	0,004	0,004	1,190
120	0,004	0	1,200

Tableau 29: Cinétique d'extraction de l'HE de romarin par hydrodistillation (Boutekedjiret, 1999)

Temps (min)	M _{HE(r)} (g)	M _{HE(s)} (g)	R _{HE} (%) (HD)
0	0	0,176	0,000
5	0,048	0,128	0,120
10	0,036	0,092	0,210
15	0,032	0,060	0,290
20	0,016	0,044	0,330
25	0,008	0,036	0,350
30	0,016	0,020	0,390
45	0,008	0,012	0,410
60	0,004	0,008	0,420
90	0,004	0,004	0,430
120	0,004	0	0,440

M_{HE(r)} : Masse de l'huile essentielle extraite en grammes à chaque instant ;

M_{HE(s)} : Masse de l'huile essentielle restante dans le végétal en grammes ;

R_{HE} : Rendement cumulé en huile essentielle à chaque instant.

Le rendement en huile essentielle à été calculé par rapport à la masse végétale sèche à l'aide la formule (I) :

$$R_{HE}(\%) = \frac{M_{HE(r)}}{M_{Végétal}} * 100 \quad (I)$$

$$tq: M_{Végétal} = (1 - H)M = 40g$$

Les données du Tableau 28 et 29 sont représentées dans la Figure 44 :

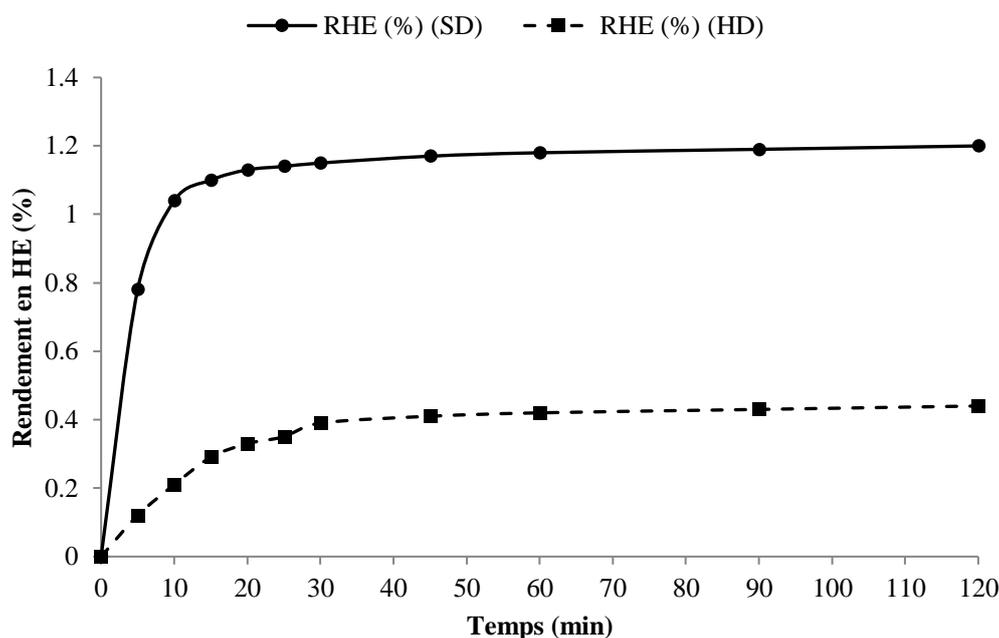


Figure 44 : Evolution du rendement en HE de romarin au cours de l'entraînement à la vapeur d'eau et l'hydrodistillation (Boutekedjiret, 1999)

Le rendement total en HE de romarin obtenu par entraînement à la vapeur d'eau est de 1,2 %. L'étude a montré que l'extraction par entraînement à la vapeur d'eau se fait en deux étapes : La première est rapide (entre 0 et 10 min) et se fait à vitesse constante, pendant laquelle 80% de l'huile est récupérée. Cette étape correspond à l'extraction de l'huile localisée dans les sites superficiels très abondants et facilement accessibles. La deuxième étape est lente et se fait à vitesse variable décroissante. Elle correspond à l'extraction de l'huile emmagasinée dans les sites internes difficiles d'accès (Boutekedjiret, 1999). La durée d'extraction pourrait donc être réduite.

Dans le cas de l'hydrodistillation, le rendement total en HE de romarin est de 0,44 % plus faible que celui obtenu par entraînement à la vapeur d'eau. L'étude a montré que l'extraction par hydrodistillation se fait aussi en deux étapes : La première (entre 0 et 30 min) est caractérisée par une augmentation progressive mais assez rapide du rendement, pendant laquelle 88% de l'huile est récupérée. Cette étape correspond à l'extraction de l'huile superficielle. La deuxième étape est lente et correspond à l'extraction de l'huile emmagasinée dans les sites internes.

La différence entre la vitesse et le rendement de l'extraction par hydrodistillation et ceux de l'entraînement à la vapeur peut être due à la résistance au transfert de matière qui est plus grande dans le premier cas car la diffusion se fait à travers le solide puis le liquide et enfin la vapeur (système triphasique), les particules doivent d'abord traverser le liquide remplissant les pores pour atteindre la vapeur et être entraînées ce qui ralentit le phénomène ; alors que

dans le cas de l'entraînement à la vapeur, le transfert se fait à partir du solide vers la vapeur directement (système byphasique). De plus, dans le cas de l'hydrodistillation, certains composés de l'huile essentielle ayant une affinité vers l'eau sont dissous dans celle-ci et ne sont pas entraînés par la vapeur alors que dans le deuxième cas, tous les composés sont emportés directement par la vapeur d'eau.

Une étude par plans d'expérience a aussi été menée pour étudier la cinétique d'extraction par entraînement à la vapeur. Les paramètres expérimentaux et les résultats sont représentés graphiquement dans la Figure 45 :

Tableau 30: Paramètres opératoires choisis pour le plan d'expériences (Boutekedjiret, 1999)

Exp	Mv (g)	Qv (g/min)
I	100	10
II	300	10
III	100	30
IV	300	30

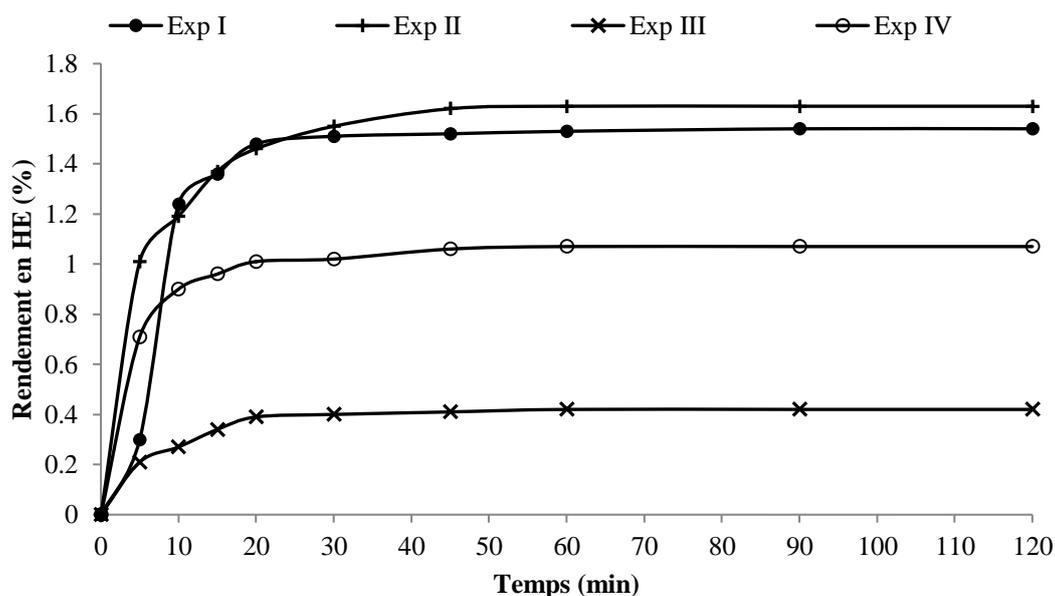


Figure 45: Cinétique d'extraction de l'HE de Romarin sous différentes conditions opératoires (Boutekedjiret, 1999)

L'expérience a montré que le rendement obtenu est plus important et l'extraction a été plus rapide dans le cas de l'expérience II. Ce qui nous permet de déduire que l'augmentation du débit engendre une diminution du rendement alors que l'augmentation de la masse du végétal conduit à l'augmentation du rendement.

2.4.1.2 Cinétique des constituants majoritaires

L'étude de Boutekedjiret (Boutekedjiret et al., 2003) donne aussi le suivi de la teneur relative de quelques constituants majoritaires du romarin algérien lors de l'extraction par entraînement à la vapeur d'eau et l'hydrodistillation. L'huile a été récupérée à des intervalles de temps réguliers et analysée par CPG. Le rendement de chaque constituant en fonction du temps a été calculé et rapporté dans les tableaux 31 et 32 :

Tableau 31: Cinétique d'extraction des composés majoritaires de l'HE de romarin par entraînement à la vapeur d'eau

Temps (min)	R _{1,8-cinéole} (%)	R _{Camphre} (%)	R _{Bornéol} (%)	R _{α-Terpinéol} (%)	R _{β-Caryophyllène} (%)	R _{δ-Cadinène} (%)
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	0,398	0,117	0,031	0,023	0,016	0,001
10	0,411	0,169	0,068	0,049	0,068	0,006
15	0,411	0,170	0,071	0,052	0,085	0,007
20	0,411	0,170	0,071	0,052	0,090	0,010
30	0,415	0,171	0,071	0,052	0,092	0,012

Tableau 32: Cinétique d'extraction des composés majoritaires de l'HE de romarin par hydrodistillation

Temps (min)	R _{1,8-cinéole} (%)	R _{Camphre} (%)	R _{Bornéol} (%)	R _{α-Terpinéol} (%)	R _{Bornyl acetate} (%)	R _{β-Caryophyllène} (%)
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10	0,071	0,042	0,027	0,029	0,011	0,011
20	0,077	0,055	0,047	0,059	0,019	0,023
30	0,077	0,055	0,055	0,068	0,021	0,025

L'analyse de ces résultats permet de déduire que dans le cas de l'entraînement à la vapeur d'eau, les constituants sont récupérés dans l'ordre croissant de leur température d'ébullition. L'augmentation rapide de la teneur des constituants dès les premières minutes correspond à l'extraction de l'huile localisée à la surface du végétal. La teneur en 1,8-cinéole et en camphre augmente encore une fois après 30 minutes indiquant l'extraction de l'huile situées dans les sites endogènes.

Les données du Tableau 31 et 32 sont représentées graphiquement dans les figures 46 et 47 :

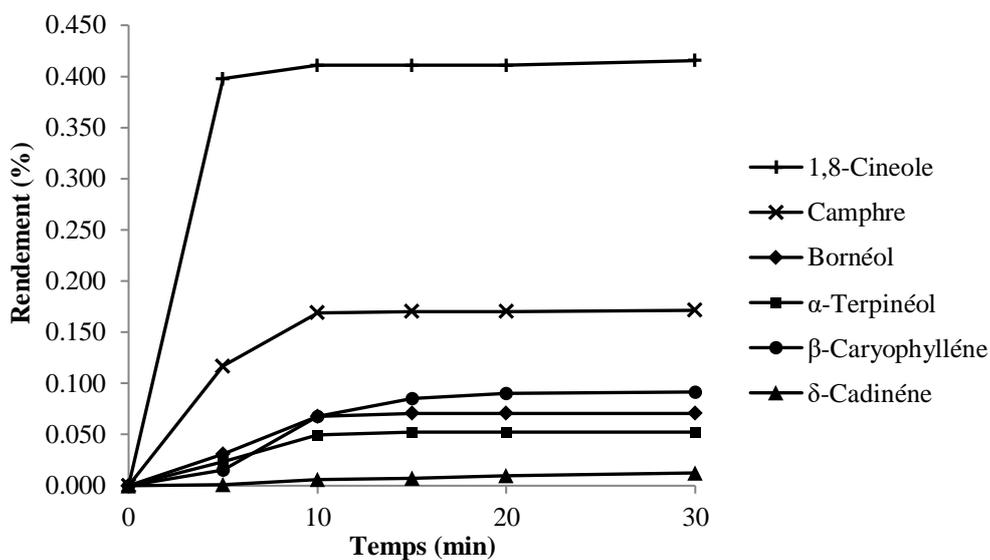


Figure 46: Cinétique d'extraction des constituants majoritaires de l'HE de romarin par entraînement à la vapeur d'eau (Boutekedjiret, 1999)

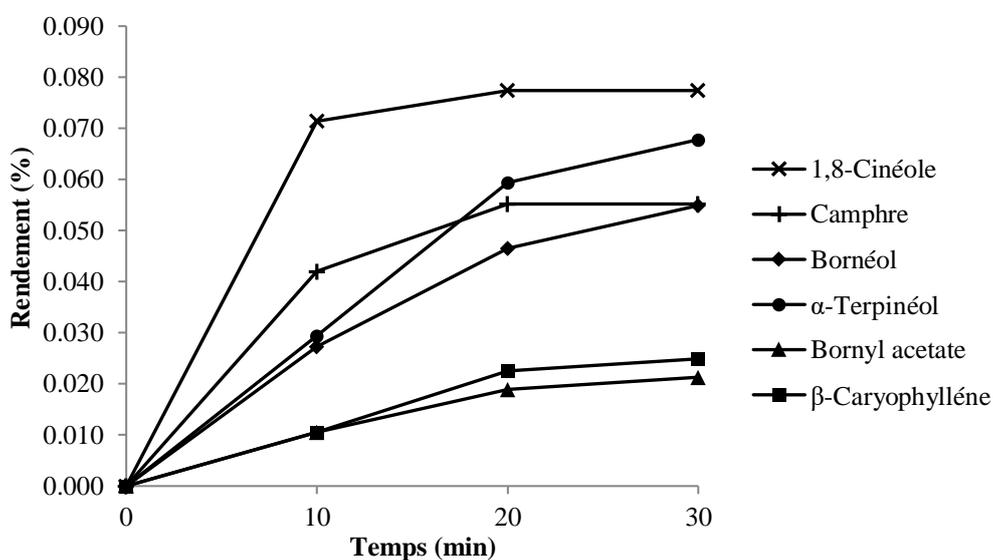


Figure 47: Cinétique d'extraction des constituants majoritaires de l'HE de romarin par hydrodistillation (Boutekedjiret, 1999)

Par contre, dans le cas de l'hydrodistillation, les constituants ne sont pas récupérés dans l'ordre croissant de leur température d'ébullition. Certains auteurs Morin et Coll. (Morin et al., 1985) suggèrent que l'ordre de sortie des constituants est dicté par leur polarité et non par leur volatilité. Le 1,8-Cinéole et le Camphre sont les premiers à être récupérés à 10 minutes du début de l'extraction. Ensuite les rendements en Bornéol, α -Terpinéol, Bornyl acétate et β -Caryophyllène atteignent leurs valeurs optimales après 20 minutes avant de diminuer au delà de 30 minutes.

Pour obtenir une huile plus riche en eucalyptol (1,8-Cinéole) il est favorable de choisir une durée de traitement plus courte (10 minutes par exemple).

2.4.2 *Pistacia lentiscus* L. (Pistachier)

2.4.2.1 Cinétique globale

2.4.2.1.1 Influence du temps d'extraction sur le rendement

- (Nacer-Bey, 2003) :

L'extraction ainsi que l'évolution du rendement en huile essentielle de *Pistacia lentiscus* Algérien par hydrodistillation en vue de l'étude cinétique a fait l'objet d'un travail antérieur de magistère. Une masse de 100 g de végétal frais (feuilles et tiges) coupé en 2 cm de longueur à taux d'humidité égal à 12% a été utilisée durant 4 heures d'extraction. La vapeur produite avec un débit relatif (masse de vapeur / masse de substrat végétal / temps) de 0,08 g / g. min et une température de distillat à la sortie de 25°C (Nacer-Bey, 2003). Les résultats sont donnés dans le tableau 33 et la figure 48.

Tableau 33: Cinétique d'extraction de l'HE de pistachier par hydrodistillation
(Nacer-Bey, 2003)

Temps (min)	Masse de l'HE (g)	Masse cumulée (g)	Rendement (%)
5	0.0026	0.0026	0,003
15	0.0067	0.0093	0,010
30	0.0023	0.0116	0,012
45	0.0007	0.0123	0,013
60	0.0009	0.0132	0,014
90	0.0012	0.0144	0,015
120	0.0013	0.0157	0,016
180	0.0012	0.0169	0,017
240	0.0001	0.0170	0,017

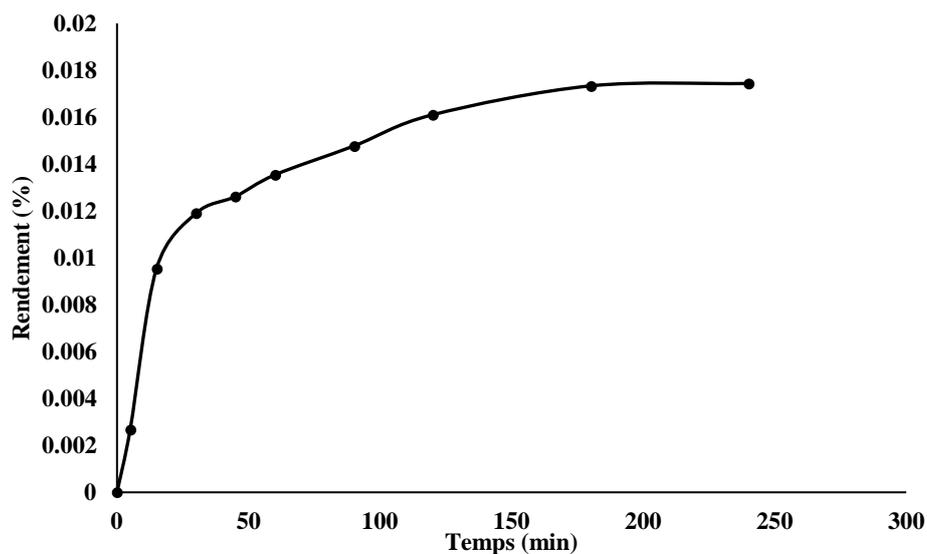


Figure 48 : Evolution du rendement en HE de pistachier en fonction de la durée d'extraction (Nacer-Bey, 2003)

Cette courbe représente l'évolution du rendement en huile essentielle de *Pistacia Lentiscus* L. en fonction de la durée d'extraction par hydrodistillation et montre la présence de deux parties :

- **La première est rapide** située au début d'extraction et n'excédant pas une demi-heure et durant laquelle on constate une évolution croissante et rapide du rendement, où 75% de l'huile essentielle est récupérée (Nacer-Bey, 2003).
- **La deuxième est lente** et plus ralentie car au-delà (c'est à – dire une demi-heure plus tard) cette courbe tend à se stabiliser et nous observons une évolution lente du rendement (Nacer-Bey, 2003).

D'après cette cinétique l'huile essentielle de *Pistacia lentiscus* est suggérée présente dans des sites sécréteurs de différentes accessibilités pour la vapeur (Nacer-Bey, 2003).

2.4.3 *Mentha spicata* L. (Menthe verte)

2.4.3.1 Cinétique globale

Yahiaoui a étudié l'extraction de l'huile essentielle de menthe verte Algérienne provenant du nord (Larbaâ, Blida) et du sud du pays (Chott, Ouargla) par hydrodistillation dans le but d'optimiser la durée d'extraction (Yahiaoui, 2005). L'expérience a été d'abord menée pendant 3 heures, une durée qui c'est avéré excessive et a été ensuite réduite à 90 minutes. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 34 :

Tableau 34: Cinétique d'extraction de l'HE de menthe verte du Nord et du Sud d'Algérie par hydrodistillation (Yahiaoui, 2005)

Durée (min)	0	5	10	15	30	45	60	90
Nord R (%)	0,000	0,396	0,603	0,706	0,856	0,926	0,959	1,000
Sud R (%)	0,000	0,250	0,400	0,490	0,620	0,700	0,740	0,790

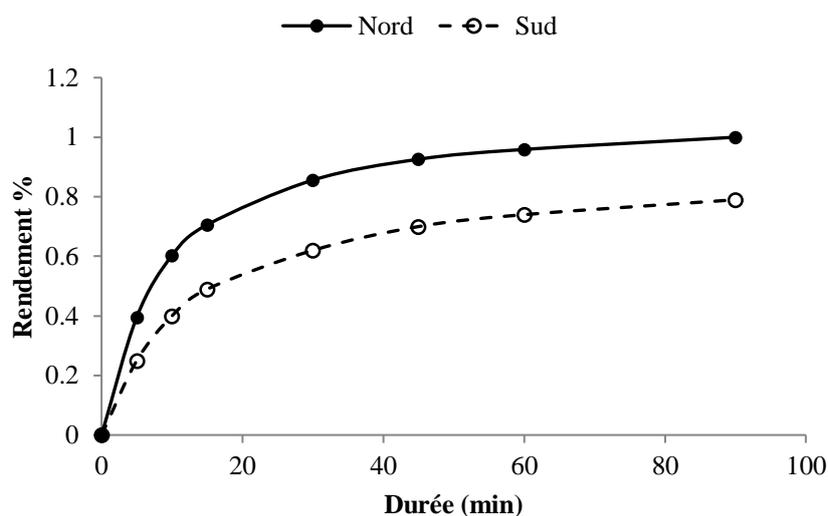


Figure 49: Evolution du rendement en HE de menthe verte du Nord et du Sud Algérien en fonction de la durée d'extraction (Yahiaoui, 2005)

D'après ces résultats il a été conclu que la durée optimale d'extraction est de 90 min qui est suffisante pour récupérer plus de 90% de l'huile essentielle présente dans le végétal. Le rendement augmente lentement pour atteindre une valeur de 1% et 0,79% pour l'échantillon du Nord et du Sud respectivement. L'extraction se fait en une seule étape.

2.4.3.2 Cinétique des constituants majoritaires

Une étude de la cinétique de quelques composés majoritaires de l'HE de la menthe verte a aussi été menée par Benyoussef et Coll. (Benyoussef et al., 2005) et les résultats sont donnés dans le tableau 35 :

Tableau 35: Cinétique d'extraction des composés majoritaires de l'HE de menthe verte par hydrodistillation (Benyoussef et al., 2005)

Durée (min)	0	30	60	90
R Carvone (%)	0,000	0,410	0,480	0,480
R 1,8-Cinéole (%)	0,000	0,022	0,022	0,022
R (Z)-Carvéol (%)	0,000	0,009	0,010	0,015
R Germacrène D (%)	0,000	0,007	0,008	0,013

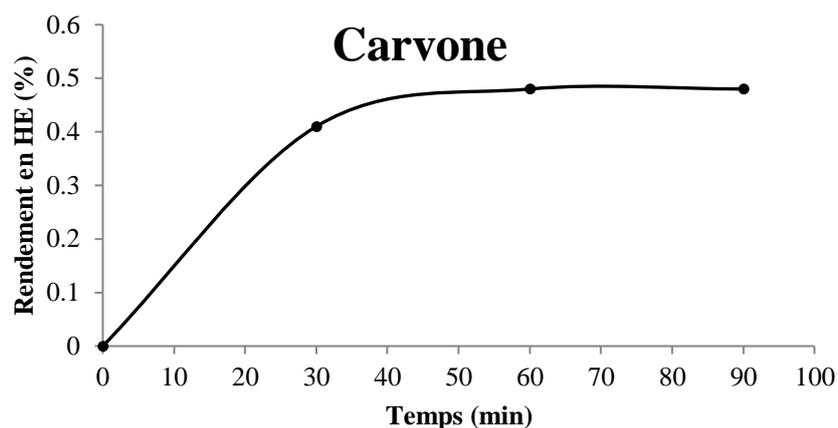


Figure 50: Evolution du rendement en carvone au cours de l'hydrodistillation de *Mentha spicata* (Benyoussef et al., 2005)

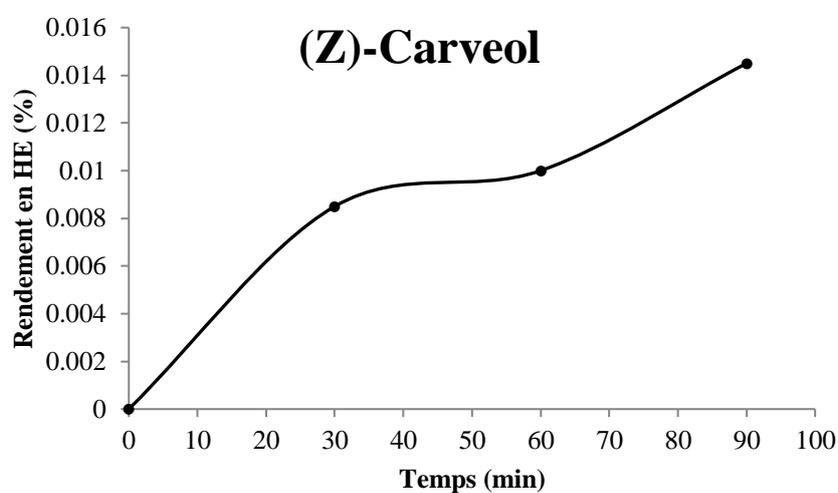


Figure 51: Evolution du rendement en (Z)-carvéol au cours de l'hydrodistillation de *Mentha spicata* (Benyoussef et al., 2005)

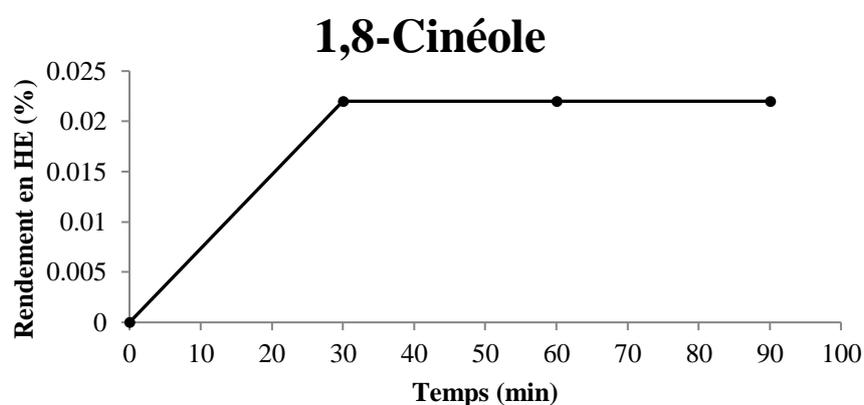


Figure 52: Evolution du rendement en 1,8-cinéole au cours de l'hydrodistillation de *Mentha spicata* (Benyoussef et al., 2005)

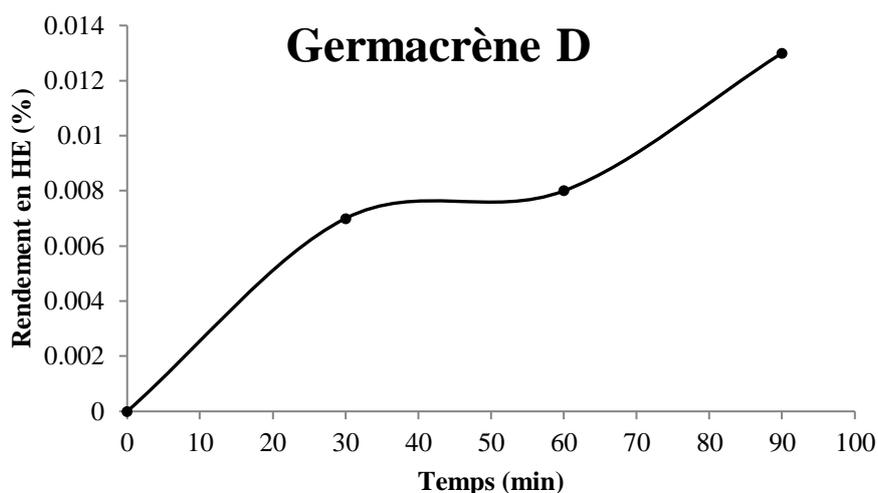


Figure 53: Evolution du rendement en germacrène D au cours de l'hydrodistillation de *Mentha spicata* (Benyoussef et al., 2005)

Les résultats montrent que si l'on s'intéresse à la récupération d'une huile essentielle riche en carvone et en 1,8-cinéole, il serait plus rentable de faire un traitement pendant une courte durée (30 minutes). Cependant, des durées de traitement plus longues permettraient d'avoir un bon rendement en (Z)-Carvéol et en Germacrène-D (Benyoussef et al., 2005).

2.4.4 *Pimpinella anisum* L. (Anis vert)

2.4.4.1 Cinétique globale

2.4.4.1.1 Influence du temps d'extraction sur le rendement

- (Boumahdi et al., 2020) :

L'extraction du *Pimpinella anisum* Algérien à la fois par simple hydrodistillation et par hydrodistillation assistée par micro-ondes (MAHD) ainsi que l'évolution des rendements en huile essentielle obtenue à partir de ses 2 procédés en vue de l'étude cinétique a fait l'objet d'un travail antérieur de ces auteurs (Boumahdi et al., 2020)

Le procédé d'extraction par hydrodistillation dans ce cas a été réalisé au moyen d'un appareil de type Clevenger modifié (figures 54 et 55).

Tableau 36: Conditions opératoires de l'extraction de l'huile essentielle d'anis par hydrodistillation et MAHD (Boumahdi et al., 2020)

Hydrodistillation (HD)		Hydrodistillation assistée par micro-ondes (MAHD)	
Masse Végétale (g)	60	Masse Végétale (g)	40
Puissance de chauffage (W)	142	Puissance de chauffage(W)	600
Quantité d'eau (l)	0.5	Quantité d'eau (l)	0.5
Durée totale de l'extraction (min)	330	Durée totale de l'extraction (min)	90

Tableau 37 : Cinétique d'extraction de l'HE d'anis par hydrodistillation assistée par micro-ondes (MAHD)

Temps (min)	6	11	16	21	36	51	66	80	95	110	126
Rendement (%)	0	0,693	1,198	1,540	1,815	2,149	2,364	2,621	2,819	2,828	2,855

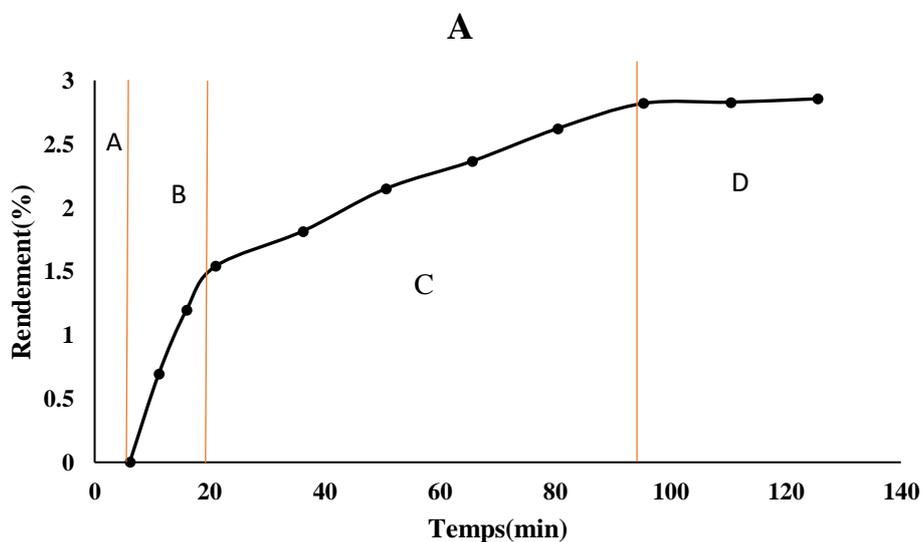


Figure 54 : Evolution du rendement en HE de *Pimpinella anisum* en fonction de la durée d'extraction (cas de l'extraction par hydrodistillation assistée par micro-ondes (MAHD)) (Boumahdi et al., 2020)

Tableau 38 : Cinétique d'extraction de l'HE d'anis par hydrodistillation (HD) (Boumahdi et al., 2020)

Temps (min)	Rendement (%)
32	0,000
38	0,418
43	0,660
50	1,046
64	1,233
79	1,662
95	1,849
125	2,168
155	2,366
185	2,575
216	2,807
245	2,939
275	2,994
305	3,115
334	3,269
365	3,280
395	3,280

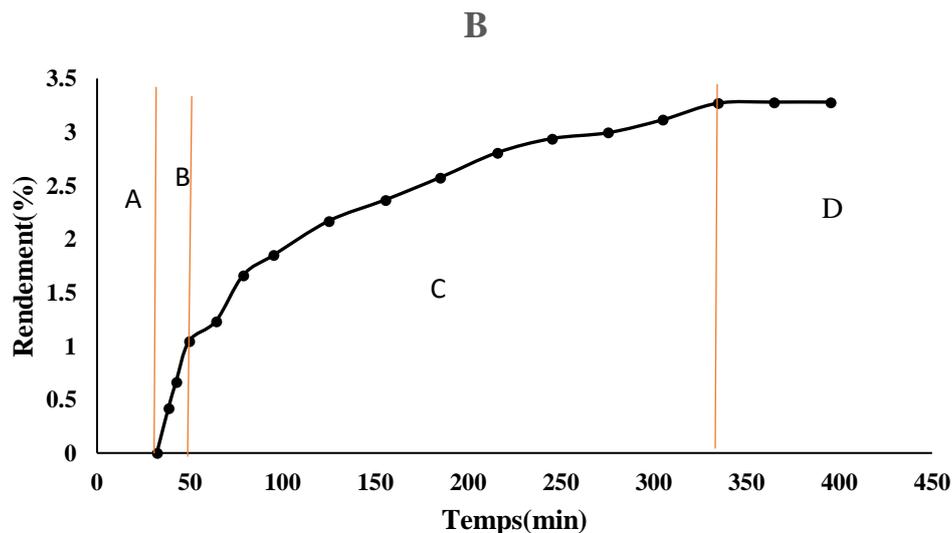


Figure 55: Evolution du rendement en HE de *Pimpinella anisum* en fonction de la durée d'extraction (cas de l'extraction par hydrodistillation) (Boumahdi et al., 2020)

- Les durées d'extraction des 2 procédés sont respectivement 1h 30min pour l'MAHD et 5h30 min pour l'HD, donc l'MAHD a réduit le temps d'extraction de 4 heures.

Ces deux courbes cinétiques montrent la présence de 4 phases :

- Durant la première (**A**) aucune extraction de l'HE de *Pimpinella anisum* ne se produit, cette étape correspond à l'augmentation de la température au sein du réacteur et liée au chauffage de la matrice végétale, qui prend 5 min pour l'MAHD et 30 min pour l'HD.
- Dans la deuxième (**B**) on note une augmentation linéaire du rendement qui est rapide dans le cas d'extraction par MAHD par rapport à HD, où près de 55% et 22% a été extrait après 20 et 50 min pour MAHD et HD respectivement. Les rendements en HE dans ces 2 courbes continuent à augmenter d'une manière importante et significative (**C**) jusqu'à atteindre le palier (**D**), où 93% et 95.4 % des rendements sont évalués pour l'MAHD et l'HD respectivement.

D'une manière générale ces 2 courbes cinétiques, montrent des évolutions exponentielles lentes. Cela est dû à la localisation endogène des sites sécréteurs qui sont difficilement accessibles (Boumahdi et al., 2020).

2.4.4.1.2 Influence de la masse de matière végétale

La figure 56 représente l'évolution du rendement d'extraction en fonction de la masse de la matière végétale dans le cas des 2 procédés d'extraction MAHD (A) et HD (B).

Tableau 39 : Evolution du rendement en fonction de la masse de la matière végétale pour MAHD (A)
(Boumahdi et al., 2020)

Temps (min)	Rendement (%)		
	m=60g	m=50g	m=40g
0	0	0	0
15	1,380	1,4979	1,553
30	1,680	1,805	1,680
45	1,854	1,972	2,121
60	1,950	2,084	2,334
75	1,999	2,164	2,580
90	2,166	2,299	2,769

Tableau 40 : Evolution du rendement en fonction de la masse de la matière végétale pour HD (B)
(Boumahdi et al., 2020)

Temps (min)	Rendement (%)		
	m=40g	m=50g	m=60g
0	0	0	0
1	1,152	1,198	1,254
2	2,091	2,118	2,174
3	2,520	2,548	2,613
4	2,885	2,820	2,949
5	2,907	2,851	3,147
6	3,003	3,151	3,318

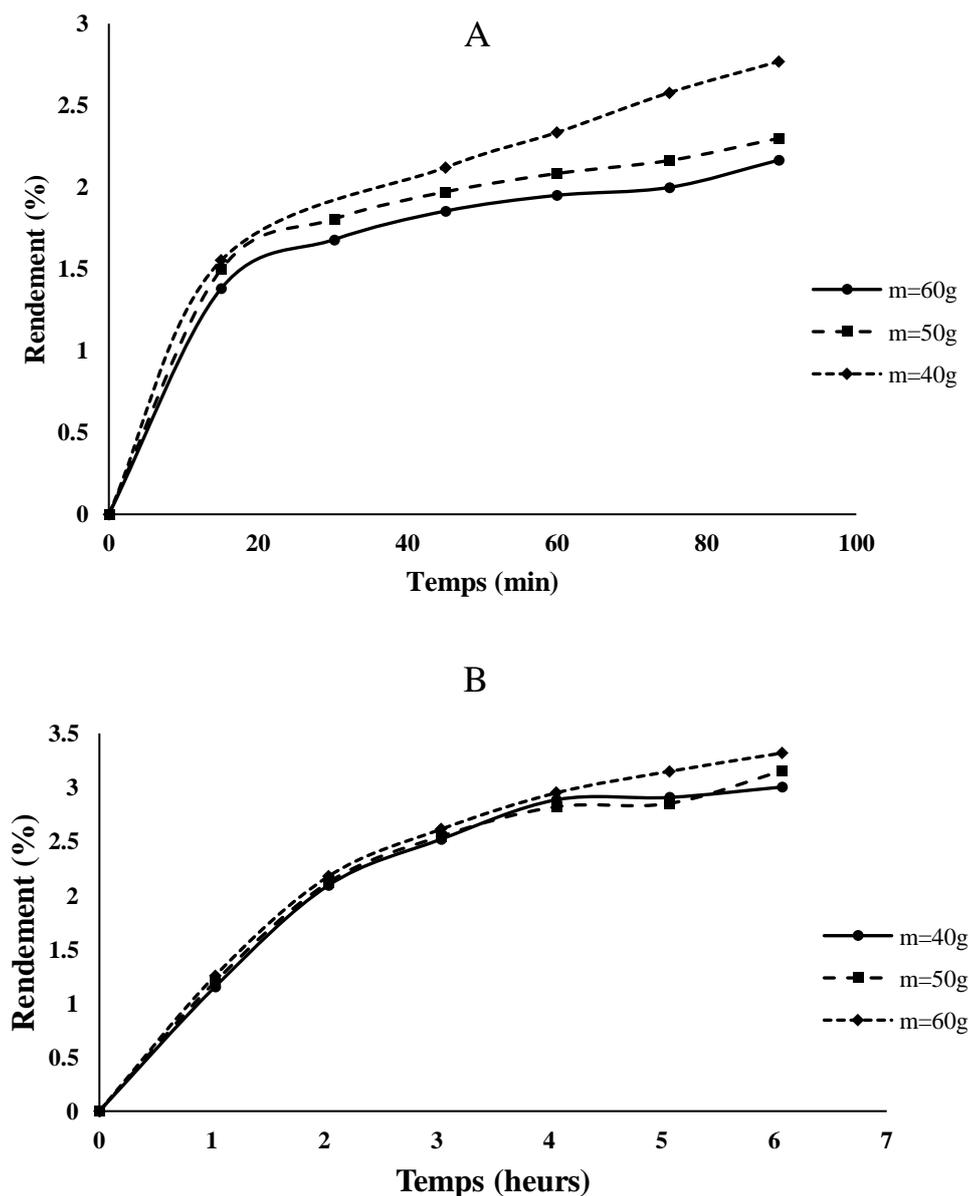


Figure 56: Evolution du rendement de l'HE de *Pimpinella anisum* en fonction de la masse de matière végétale pour les procédés (A) MAHD et (B) HD

(Boumahdi et al., 2020)

- Pour une puissance de chauffage fixée à **142 W**, l'extraction par le procédé HD donne un meilleur rendement pour une masse de 60 g (3.3 ± 0.05) % par 0.5 L d'eau. Cependant l'extraction par MAHD donne son meilleur rendement (2.81 ± 0.01) % pour une masse de 40 g à une puissance de chauffage de **600 W**.

2.4.4.1.3 Influence de la puissance de chauffage

L'évolution du rendement d'extraction en fonction de la masse et de la puissance de chauffage dans le cas des 2 procédés d'extraction **MAHD** (A) et **HD** (B) est représentée dans la figure 57 :

Tableau 41 : Evolution du rendement en fonction de la puissance de chauffage pour MAHD (A)
(Boumahdi et al., 2020)

Temps (min)	Rendement (%)		
	P=450W	P=800W	P=600W
0	0	0	0
16	1,4093	1,412	1,530
31	1,669	1,667	1,778
46	2,017	1,986	2,104
61	2,229	2,209	2,319
76	2,489	2,449	2,559
91	2,694	2,641	2,751

Tableau 42 : Evolution du rendement en fonction de la puissance de chauffage pour HD (B)
(Boumahdi et al., 2020)

Temps (heurs)	Rendement (%)		
	P=366W	P=216W	P=142W
0	0	0	0
1	0,573	0,739	1,237
2	1,515	1,672	2,188
3	1,950	2,125	2,632
4	2,303	2,468	2,984
5	2,489	2,646	3,171
6	2,667	2,832	3,330

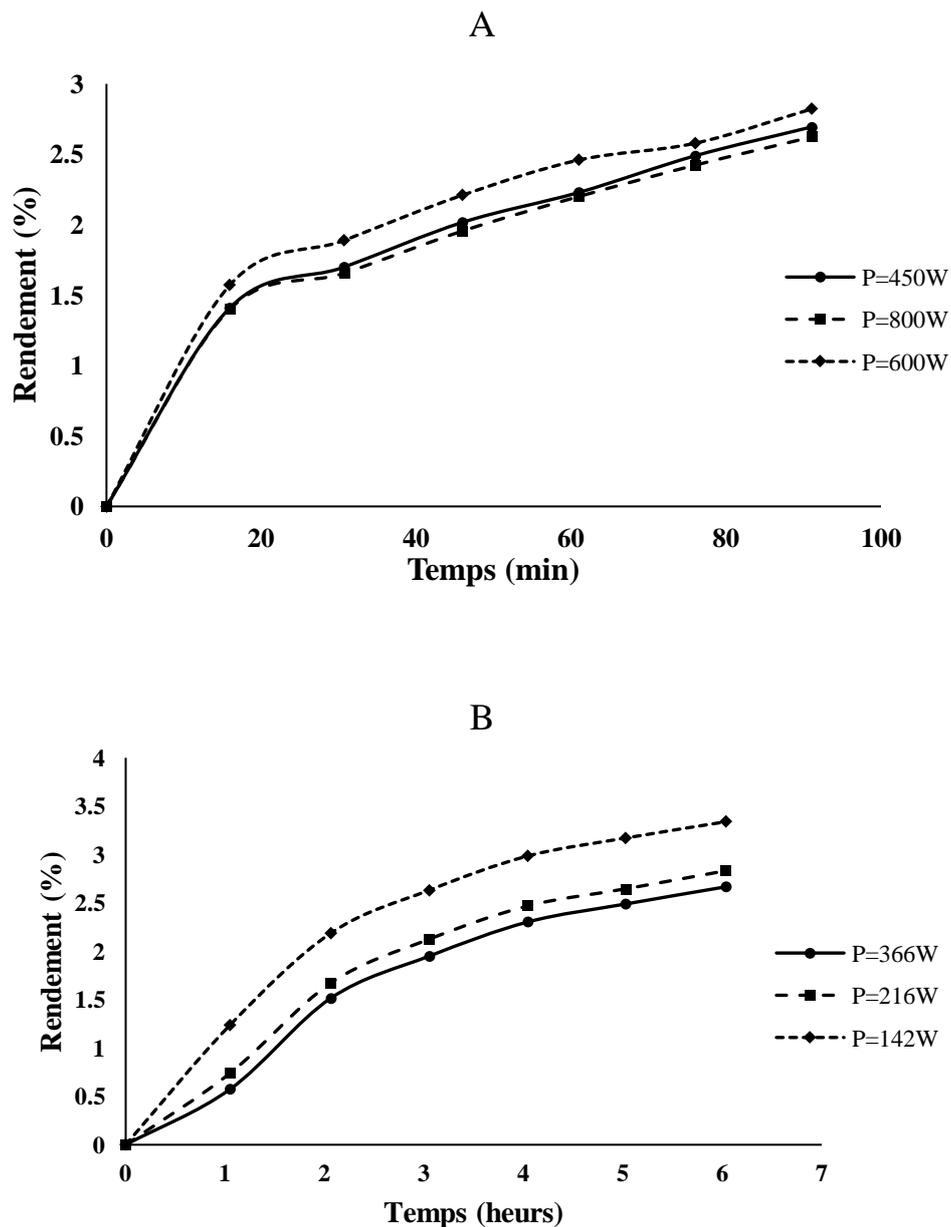


Figure 57: Evolution du rendement de l'HE de *Pimpinella anisum* en fonction de la puissance de chauffage pour les procédés (A) MAHD et (B) HD (Boumahdi et al., 2020)

- Pour le procédé **HD**, le rendement est inversement proportionnel à la puissance de chauffage qui sera fixée dans cette étude à 142W, qui donne un meilleur rendement (3.3 ± 0.05) % pour une masse de 60 g.
- Et pour le **MAHD**, cette puissance sera fixée à 600W, qui donne un meilleur rendement (2.81 ± 0.01) % pour une masse de 40 g (Boumahdi et al. 2020).

- (Benyoussef et Saibi, 2013) :

Benyoussef et Saibi (Benyoussef et Saibi, 2013) ont réalisé l'extraction de l'huile essentielle d'anis Algérien par hydrodistillation à partir de 1 Kg de matière végétale constituée des graines d'anis au moyen d'un appareil du type Clevenger modifié pendant 6 heures d'extraction. La vapeur est produite avec un débit relatif (masse de vapeur / masse de substrat végétal / temps) de 0,08 g/g.min.

La figure 58 représente l'évolution du rendement en huile essentielle de *Pimpinella anisum* en fonction du temps.

Tableau 43 : Cinétique d'extraction de l'HE d'anis
(Saibi, 2012)

Temps (min)	0	15	30	60	90	120	180	240	300	360
Rendement(%)	0	0.4	0.61	0.86	1.24	1.55	1.84	2.08	2.22	2.35

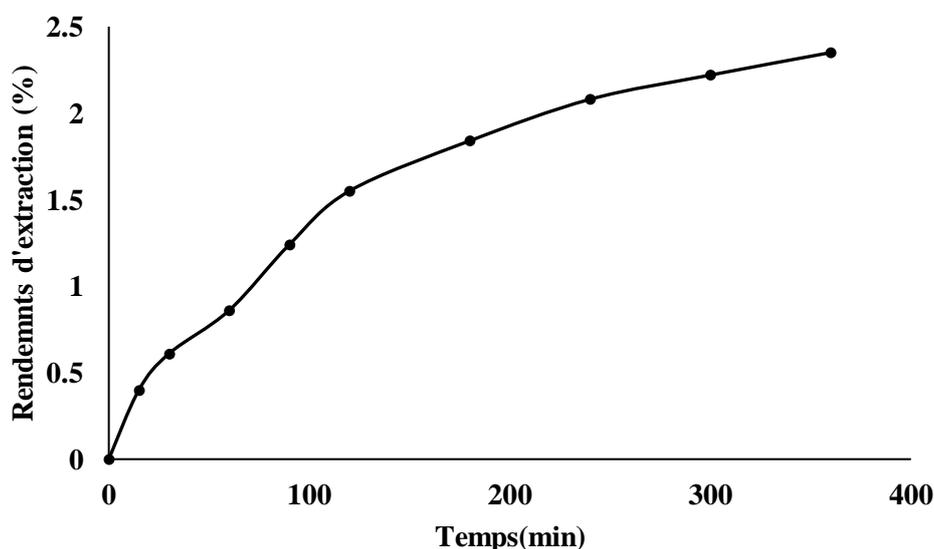


Figure 58: Evolution du rendement en HE de *Pimpinella anisum* en fonction de la durée d'extraction
(Saibi et al., 2013)

- D'après cette courbe cinétique, on note une augmentation progressive du rendement en huile essentielle de *Pimpinella anisum* en fonction de la durée d'extraction par hydrodistillation évalué à 2,35%.
- Ce comportement cinétique est dû à la localisation endogène des sites sécréteurs qui sont difficilement accessibles pour la vapeur (Saibi et al., 2013).

2.4.4.2 Cinétique des constituants

L'étude menée par (Benyoussef et Saibi, 2013) s'est intéressée aussi à l'évolution du rendement des différents composés majoritaires d'anis en fonction de la durée d'hydrodistillation en vue de l'étude cinétique que nous avons reproduit sur les figures suivantes (Saibi, 2012).

Les figures 59, 60, 61 et 62 représentent les différentes courbes cinétiques des constituants majoritaires de *Pimpinella anisum* en fonction du temps.

Tableau 44 : Cinétique d'extraction de l'HE d'anis et ces constituants majoritaires (Saibi, 2012)

Temps (min)	Rendement (%)					
	H.E.	Estragol	Anéthol	O-isoeugénol	γ -himachalène	Somme
0	0	0	0	0	0	0
15	0,400	0,010	0,160	0,010	0,002	0,182
30	0,610	0,015	0,404	0,012	0,004	0,435
60	0,860	0,021	0,682	0,016	0,007	0,726
90	1,240	0,029	1,111	0,023	0,011	1,173
120	1,550	0,034	1,439	0,029	0,014	1,516
180	1,840	0,040	1,742	0,035	0,017	1,835
240	2,080	0,043	1,954	0,039	0,021	2,056
300	2,220	0,044	2,058	0,041	0,023	2,166
360	2,350	0,045	2,171	0,043	0,026	2,286

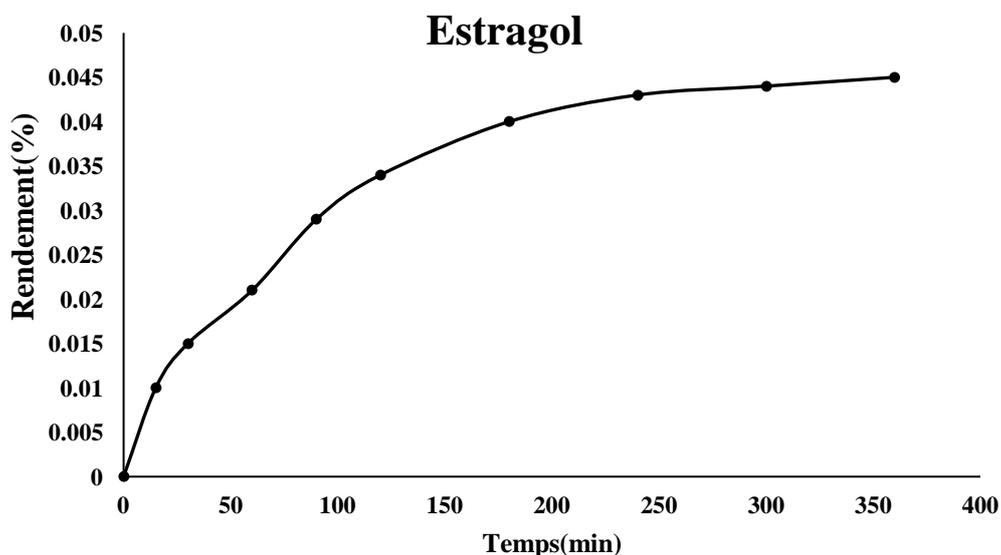


Figure 59: Evolution du rendement en estragol en fonction de temps (Saibi, 2012)

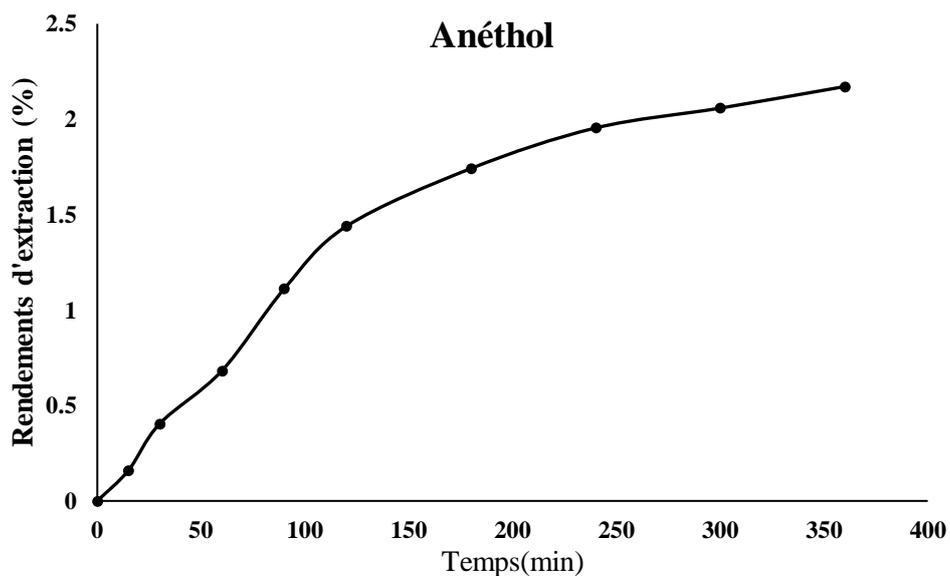


Figure 60: Evolution du rendement en anéthol en fonction du temps (Saibi, 2012)

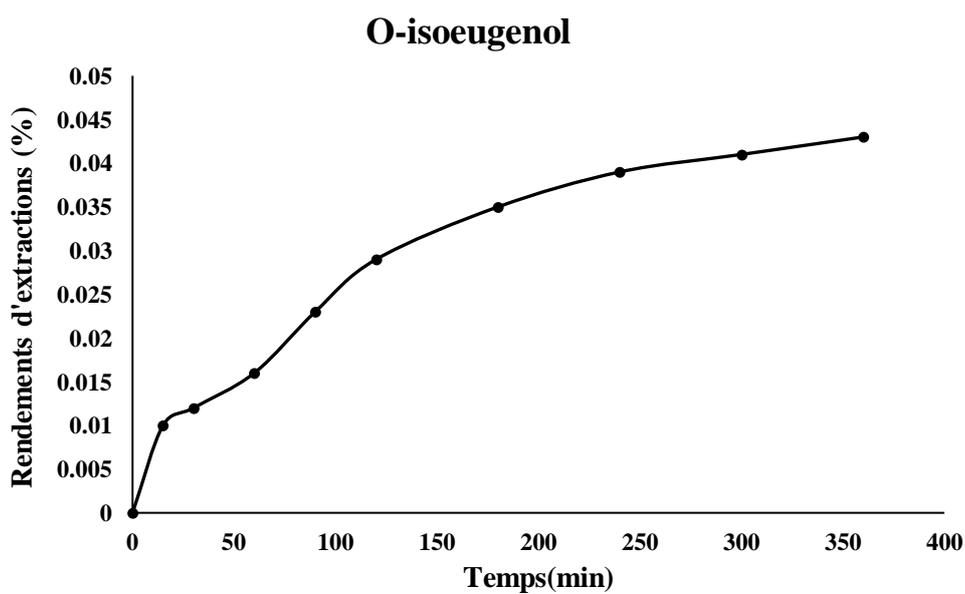


Figure 61: Evolution du rendement en O-isoeugénol en fonction du temps (Saibi, 2012)

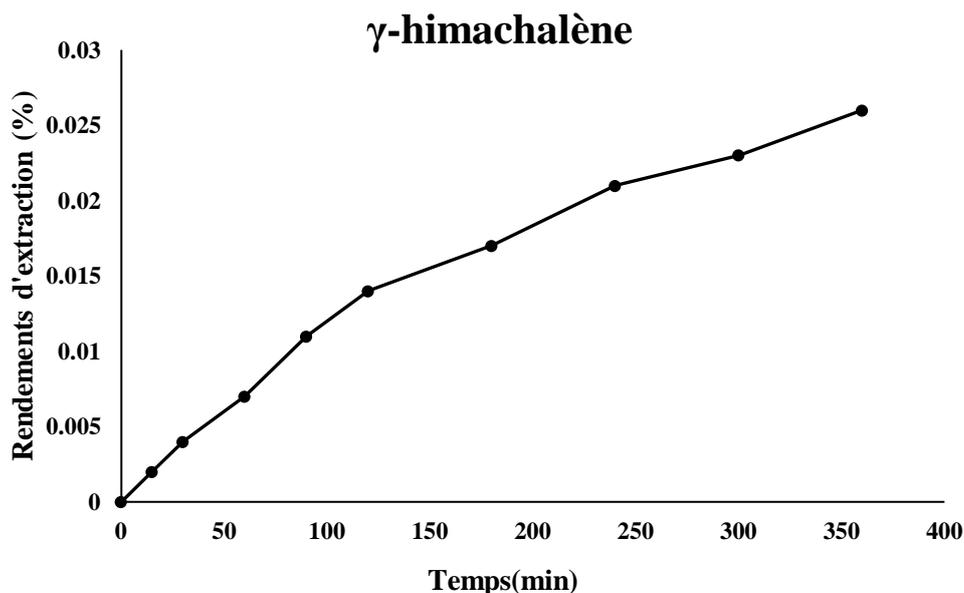


Figure 62: Evolution du rendement en γ -himachalène en fonction du temps (Saibi, 2012)

D'après ces courbes cinétiques :

- L'allure de la courbe de cinétique de l'Anéthole est similaire à celle de l'huile essentielle de *Pimpinella anisum* car ce composé constitue 92% de cette huile ce qui en fait le composé majoritaire.
- Les autres courbes cinétiques sont évoluées de manière moins importante par rapport à l'Anéthole (Saibi, 2012).

2.5 Conclusion

Les travaux antérieurs consultés dans ce chapitre nous ont permis de connaître les caractéristiques des quatre plantes étudiées et les paramètres influençant l'extraction de leurs huiles essentielles.

La composition chimique et le rendement des huiles essentielles varie selon plusieurs facteurs intrinsèques comme la génétique, la période de récolte, le climat, l'âge et l'état de la plante...etc. ainsi que d'autres facteurs opératoires tel que le procédé utilisé, la durée d'extraction, la masse, le débit,...etc.

Il est important de choisir les bonnes conditions de l'extraction afin d'obtenir un rendement optimal et une huile essentielle riche en composé recherché tout en réduisant le temps et l'énergie consommée.

Chapitre 3

Modélisation

3.1 Introduction

Afin de vérifier l'hypothèse considérant l'huile essentielle comme étant un composé unique, nous avons appliqué le modèle de 1^{er} ordre à des cinétiques d'extraction des huiles essentielles de quatre plantes et de leurs constituantes majoritaires rapportées dans des études antérieures. Le rendement en huile essentielle à tout moment est la somme des rendements de tous ses constituants. Concernant la concentration en phase vapeur, nous avons pu calculer son expression en fonction du temps à partir des paramètres du 1^{er} ordre pour chaque un des cas des études précédentes.

Enfin, nous nous sommes intéressées à l'étude de l'influence de la variation de quelques paramètres opératoires sur une réponse donnée, qui est dans notre cas la concentration en phase vapeur par planification factorielle des expériences rapportées dans des études antérieures.

3.2 Définitions

3.2.1 Modèle de 1^{er} ordre

Dans le but de simuler l'extraction de l'huile essentielle de l'écorce de citron, Koul et ses collaborateurs ont développé un modèle mathématique de premier ordre. Ce modèle a donné des résultats satisfaisants après avoir été testé à l'échelle pilote (Koul et al., 2004). Selon ces auteurs, la quantité d'huile enlevée par unité de temps est directement proportionnelle à l'huile restante et l'équation de vitesse la plus simple est donnée par la cinétique de premier ordre :

$$-\frac{dm}{dt} = km \quad (\text{II})$$

Après intégration :

$$\ln \frac{m_0}{m} = kt \quad (\text{III})$$

- **m₀** : masse de l'huile essentielle résiduelle dans le solide (g)
- **m** : masse initiale de l'huile essentielle dans le solide (g)
- **k** : Constante cinétique du modèle diffusionnel (min⁻¹)

La relation générale du modèle du 1^{er} ordre peut être écrite sous la forme :

$$Y(t) = Y_{\infty}(1 - e^{-kt}) \quad (\text{IV})$$

- **Y (t)** : Rendement en huile essentielle à l'instant t qui représente le rapport de la masse d'huile essentielle extraite sur la masse de la matière végétale.
- **Y_∞(t)** : Rendement à un temps infini.

3.2.2 Modèle de contribution des constituants

Développé par Benyoussef et Saibi (Benyoussef et Saibi, 2013) dans le but de prédire la variation du rendement de l'huile essentielle à partir de la cinétique de ces composés

majoritaires, le modèle a été appliqué à l'extraction par hydrodistillation de l'huile d'anis vert, des feuilles d'eucalyptus et des graines de coriandre et a donné des résultats satisfaisants. Ce modèle prend en considération la variation de la composition de l'huile essentielle au cours du procédé d'extraction et les changements significatifs dans les constantes cinétiques des constituants contrairement aux modèles considérant l'huile essentielle comme un pseudo-composé.

Le modèle est basé sur l'application du modèle de 1^{er} ordre (Koul et al., 2004) à chaque constituant de l'huile essentielle. L'expression de la cinétique d'extraction de chaque composé peut être écrite comme suit :

$$Y_i(t) = Y_{\infty i}(1 - e^{-k_i t}) \quad (\text{V})$$

L'expression du rendement global en huile essentielle est la somme des rendements de chaque composé, n étant le nombre total de composés :

$$Y(t) = \sum_{i=1}^n Y_{\infty i}(1 - e^{-k_i t}) \quad (\text{VI})$$

Où :

$$Y(t) = Y_{\infty} \sum_{i=1}^n g_i(1 - e^{-k_i t}) \quad (\text{VII})$$

Où :

- **n** est le nombre total de composés ;
- **Y(t)** est le rendement en l'huile essentielle en fonction du temps en %g/g de matière végétale ;
- **Y_∞** est le rendement maximal en huile essentielle à la fin de l'extraction en %g/g de matière végétale ;
- **Y_{∞i}** est le rendement maximal du composé (i) à la fin de l'extraction en %g/g de matière végétale ;
- **g_i = $\frac{Y_{\infty i}}{Y_{\infty}}$** représente la teneur du composé (i) dans l'huile essentielle auquel on peut accéder expérimentalement par analyse chromatographique ;
- **k_i** est la constante cinétique du composé (i) en min⁻¹.

Le modèle global de contribution des composants (GMCC) donné par l'équation (VI) est un modèle complexe due à l'inaccessibilité à la cinétique de tous les constituants de l'huile essentielle. Cependant, il y'a en général deux à trois composés présents en grande proportion dans l'huile essentielle. Nous pouvons ainsi réduire le nombre de termes de l'équation (VI) en considérant uniquement les composés majoritaire et en représentant le reste des composés par un seul terme. Ce modèle a été nommé modèle simplifié de contribution des composants (SMCC). Dans le cas d'un seul composé majoritaire, on aboutit à une équation à deux termes :

$$Y(t) = Y_{\infty}(1 - ge^{-k_M c t} - (1 - g)e^{-k_o c t}) \quad (\text{VIII})$$

Où k_{MC} et k_{OC} sont les constantes cinétiques du composé majoritaire et du reste des composés respectivement et g est la teneur du composé majoritaire dans l'huile essentielle.

Dans le cas de deux composés majoritaires, on obtient une équation à trois termes :

$$Y(t) = Y_{\infty}(1 - g_1 e^{-k_{MC1}t} - g_2 e^{-k_{MC2}t} - (1 - g_1 - g_2)e^{-k_{OC}t}) \quad (\text{IX})$$

Où k_{MC1} et k_{MC2} sont les constantes cinétiques des deux composés majoritaires, k_{OC} est la constante cinétique du reste des composés et g_1 et g_2 sont les teneurs des deux composés majoritaires dans l'huile essentielle.

L'équation (VIII) obtenue précédemment est similaire à l'équation à deux constantes de temps du modèle de Sovova et Aleksovski (Sovová et Aleksovski, 2006) où f représente la fraction de l'huile essentielle contenue dans les cellules brisées.

$$Y(t) = Y_{\infty}(1 - f e^{-k_1 t} - (1 - f)e^{-k_2 t}) \quad (\text{X})$$

Ce modèle fait intervenir deux cinétiques d'extraction par hydrodistillation avec des vitesses de diffusion différentes, la première est associée à l'extraction de l'huile stockée dans les cellules brisées qui est plus rapide (k_1), la deuxième est relative à l'extraction de l'huile essentielle à partir des cellules intactes (k_2).

3.2.3 Planification factorielle des expériences

Le plan d'expériences consiste à effectuer selon un programme systématique une série d'essais permettant d'aboutir à l'élaboration d'un modèle mathématique moyennant le minimum d'essai (Dugea et Girault, 1972).

3.2.3.1 Plans factoriels 2^k

Les plans factoriels à 2 niveaux sont les plans les plus couramment utilisés car les plus simples et les plus rapides à mettre en œuvre. Avec un tel plan, il sera nécessaire de mener 2^k expériences.

Chaque point expérimental permet d'obtenir une valeur de la réponse. Cette réponse est modélisée par un polynôme de la forme (Goupy, 1992) :

$$Y = a_0 + \sum a_i X_i + \sum a_{ij} X_i X_j + \dots + \sum a_{ij\dots k} X_i X_j \dots X_k \quad (\text{XI})$$

Où les coefficients sont les inconnus qu'il faut déterminer. A la fin du plan d'expériences, on obtient un système de n équations (s'il y a n essais) à p inconnus (s'il y a p coefficients dans le modèle choisi a priori). Ce système en notation matricielle s'écrit :

$$Y = X * A \quad (\text{XII})$$

- Y : est le vecteur des réponses

- **X** : est la matrice de calcul, ou matrice du modèle, qui dépend des points expérimentaux choisis pour exécuter le plan et du modèle postulé.
- **A** : est le vecteur des coefficients.

Pour le résoudre, on utilise une méthode de régression basée sur le critère des moindres carrés :

$$A = (X'X)^{-1} X'Y \quad (\text{XIII})$$

3.3 Application du modèle de 1er ordre sur les cinétiques d'extraction et calcul de la concentration en phase vapeur

Les travaux de Benyoussef et coll. (Benyoussef et al., 2019) ont prouvé en appliquant le modèle du premier ordre sur plus de 134 cinétiques d'extraction que celui-ci est valable dans la plupart des cas et est applicable pour la prédiction de la durée et le rendement de l'extraction.

Ait Amer Meziane ainsi que Chaib et Benelhadjsaid (Ait Amer Meziane, 2020; Chaib et Benelhadj Said, 2020), ont déterminé l'expression de la concentration en phase vapeur de l'HE au cours de l'extraction à partir du modèle de premier ordre. Cette expression nous permet de prévoir l'évolution de la concentration en phase fluide en fonction du temps de l'extraction.

La concentration de l'HE en phase vapeur au cours de l'extraction est donnée par :

$$C_f(t) = \frac{dY(t)}{dt} * \frac{10 * M_v}{Q} \quad (\text{XIV})$$

Dans le cas d'une cinétique de 1^{er} ordre, le rendement s'écrit comme suit :

$$Y(t) = Y_{\infty}(1 - e^{-kt}) \quad (\text{IV})$$

$$\frac{dY(t)}{dt} = Y_{\infty} k e^{-kt} \quad (\text{XV})$$

Donc :

$$C_f(t) = \frac{10 * M_v * y_{\infty} * k}{Q} * e^{-kt} \quad (\text{XVI})$$

Avec : M_v : Masse du végétal (g)

Q : Débit de vapeur ascendant (g/min)

C_f : Concentration en phase fluide (mg/g)

Dans ce chapitre, nous avons appliqué le modèle de premier ordre aux cinétiques d'extraction déjà données dans le chapitre 2. Les courbes ont été ajustées à l'aide de

l'algorithme de Levenberg-Maquardt. Le modèle est effectivement en accord avec les données expérimentales et nous avons pu calculer l'expression de la concentration en fonction du temps.

3.3.1 *Rosmarinus officinalis* L. (Romarin)

Nous avons appliqué le modèle de premier ordre à la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de romarin et de ces constituants majoritaires réalisée par Boutekedjiret (Boutekedjiret, 1999).

3.3.1.1 Huile globale

La simulation par modèle de 1^{er} ordre des cinétiques d'extraction de l'huile essentielle de romarin est représentée dans les figures 63-66. Les constantes cinétiques du modèle sont reportées dans les tableaux 45 et 46.

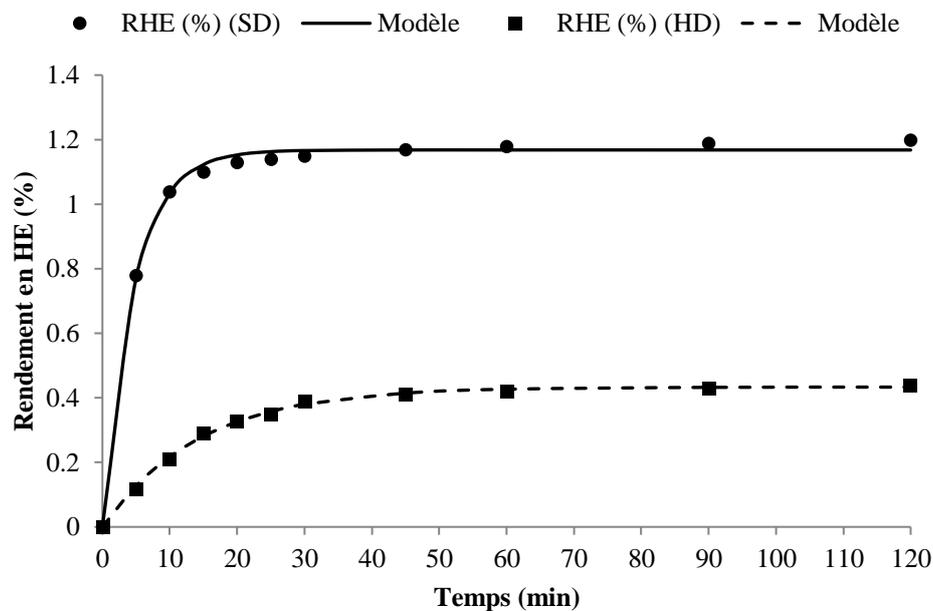


Figure 63: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de romarin par entrainement à la vapeur d'eau et hydrodistillation

Tableau 45: Paramètres du modèle de 1er ordre

	y^∞ (g/g)	k (min^{-1})	R^2
R_{HE} (%) (SD)	1,1680	0,2162	0,9972
R_{HE} (%) (HD)	0,4333	0,0696	0,9976

Nous avons aussi appliqué le modèle de 1^{er} ordre sur les cinétiques obtenues par les expériences du plan factoriel menées par Boutekedjiret (Boutekedjiret, 1999).

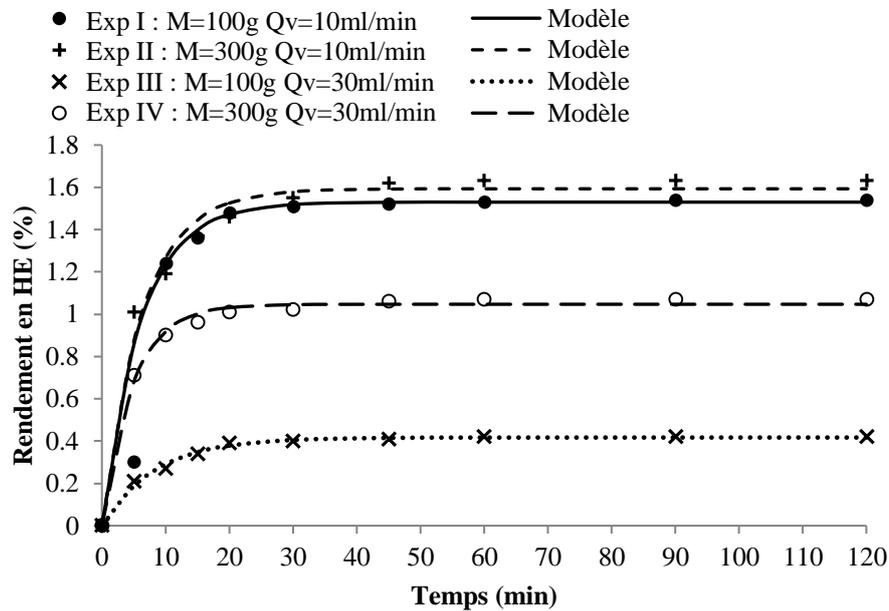


Figure 64: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction de romarin par entraînement à la vapeur d'eau

Tableau 46: Paramètres du modèle de 1er ordre

	y_{∞} (g/gs)	k (min^{-1})	R^2
Exp I	1,5300	0,1629	0,9808
Exp II	1,5930	0,1579	0,9823
Exp III	0,4170	0,1191	0,9928
Exp IV	1,0470	0,2084	0,9941

La simulation a donné des résultats en accord avec les points expérimentaux pour toutes les cinétiques avec un R^2 supérieur à 0,98.

A partir des paramètres du 1^{er} ordre déterminés précédemment, nous avons pu calculer l'expression de la concentration en phase vapeur en fonction du temps pour chaque cinétique et la représenter graphiquement comme suit :

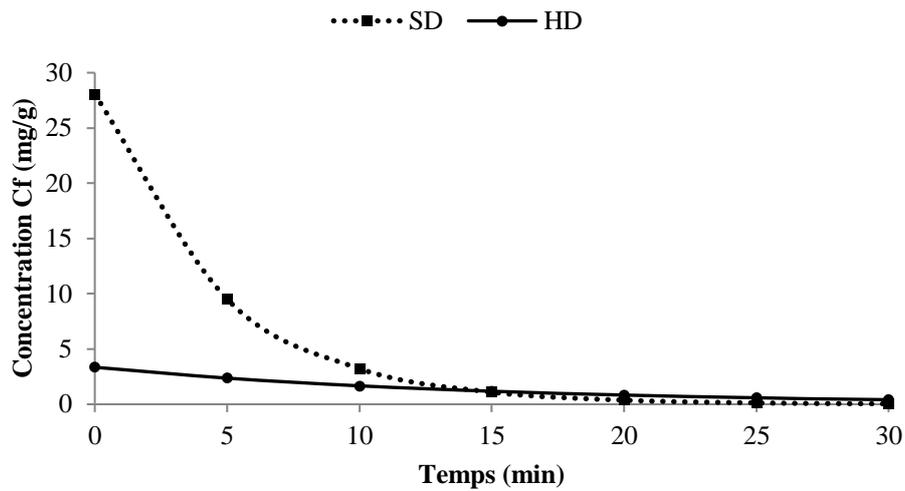


Figure 65: Evolution de la concentration en phase vapeur de l'huile essentielle de romarin en fonction du temps lors de l'entraînement à la vapeur d'eau et l'hydrodistillation

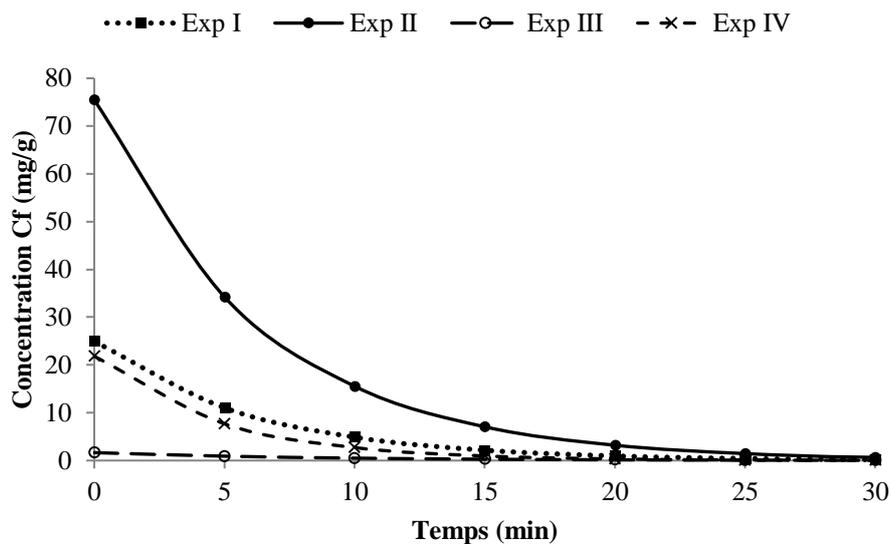


Figure 66: Evolution de la concentration en phase vapeur de l'huile essentielle de romarin en fonction du temps lors de l'entraînement à la vapeur d'eau

D'après ces résultats, la concentration est maximale au début de l'extraction et diminue au cours du temps pour atteindre une valeur nulle au bout de 30 minutes dans le cas de toutes les expériences. Comme pour le rendement, la concentration est plus élevée et diminue plus rapidement lors de l'entraînement à la vapeur d'eau comparé à l'hydrodistillation. On obtient une concentration plus importante pour les conditions de masse et de débit de 300 g et 10 ml/min respectivement.

3.3.1.2 Constituants majoritaires

L'application du modèle de premier ordre sur la cinétique d'extraction des constituants majoritaires de l'huile essentielle de romarin par entraînement à la vapeur d'eau à donné les résultats représentés dans les figures 67-71 :

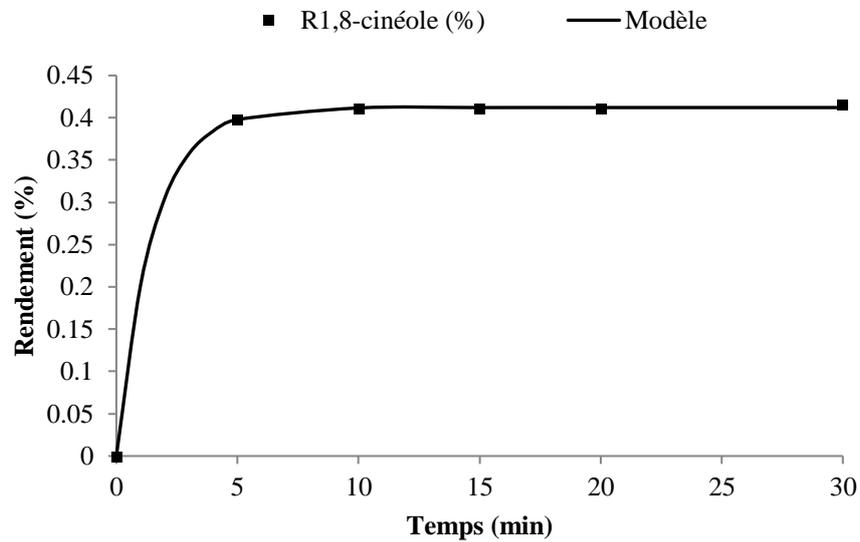


Figure 67: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du 1,8-cinéole dans l'huile essentielle de romarin par entraînement à la vapeur d'eau

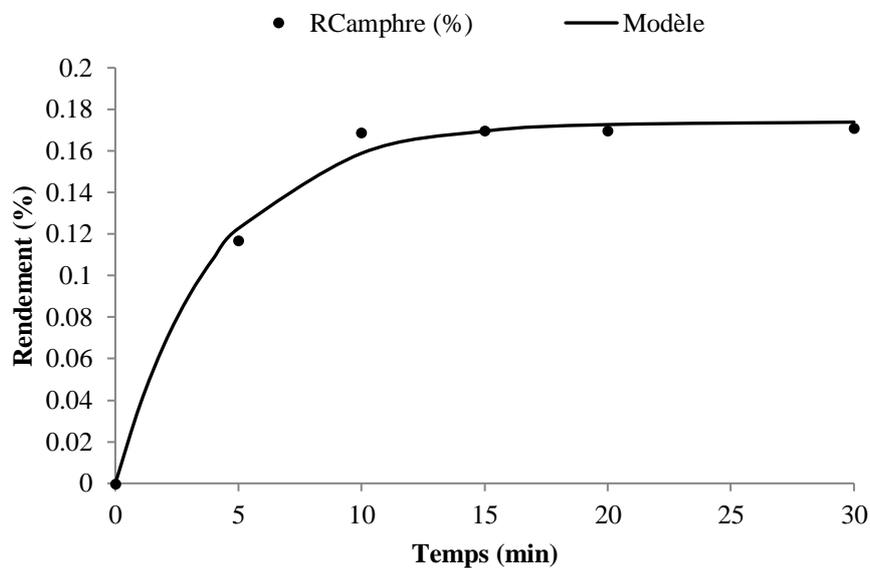


Figure 68: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du camphre dans l'huile essentielle de romarin par entraînement à la vapeur d'eau

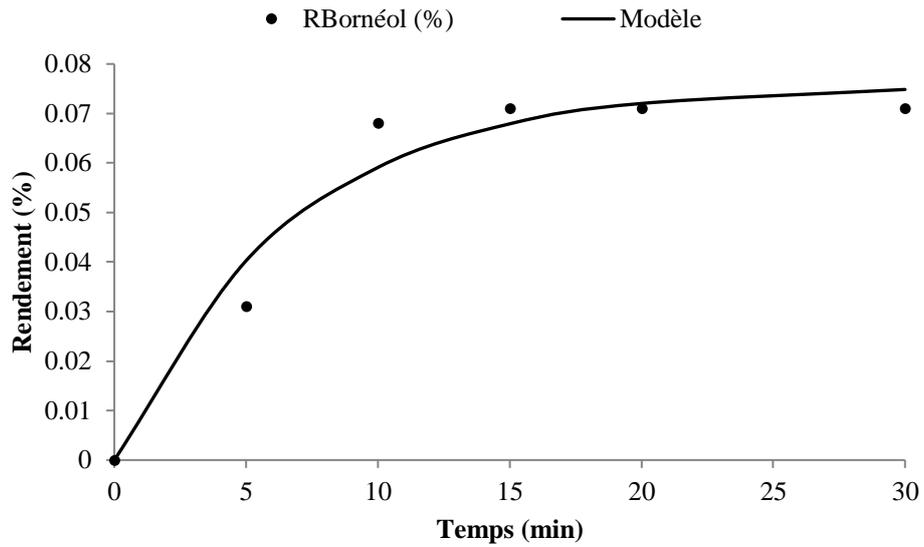


Figure 70: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du bornéol dans l'huile essentielle de romarin par entrainement à la vapeur d'eau

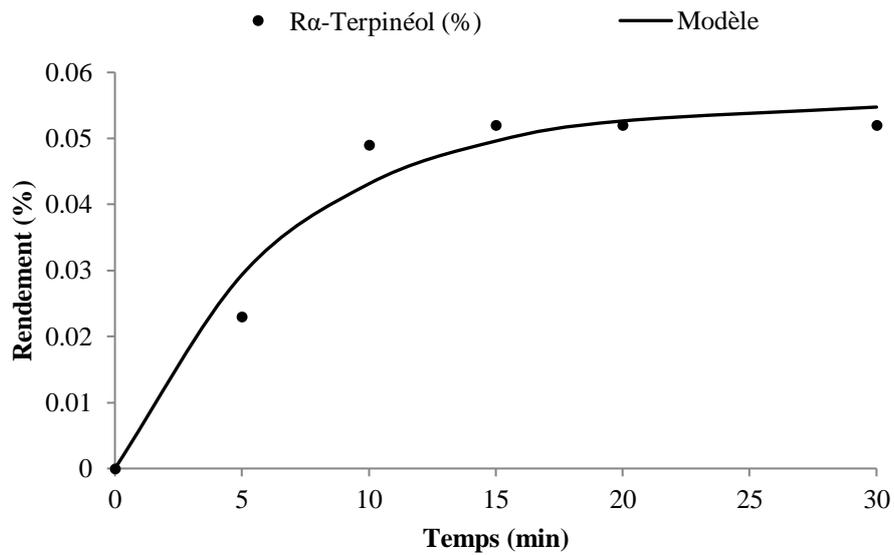


Figure 69: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du α-terpinéol dans l'huile essentielle de romarin par entrainement à la vapeur d'eau

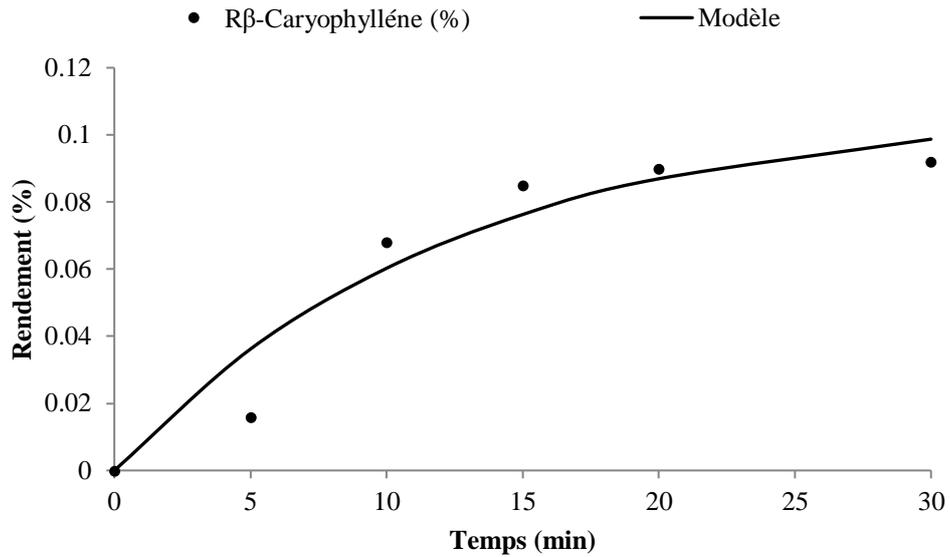


Figure 72: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du β -caryophyllène dans l'huile essentielle de romarin par entrainement à la vapeur d'eau

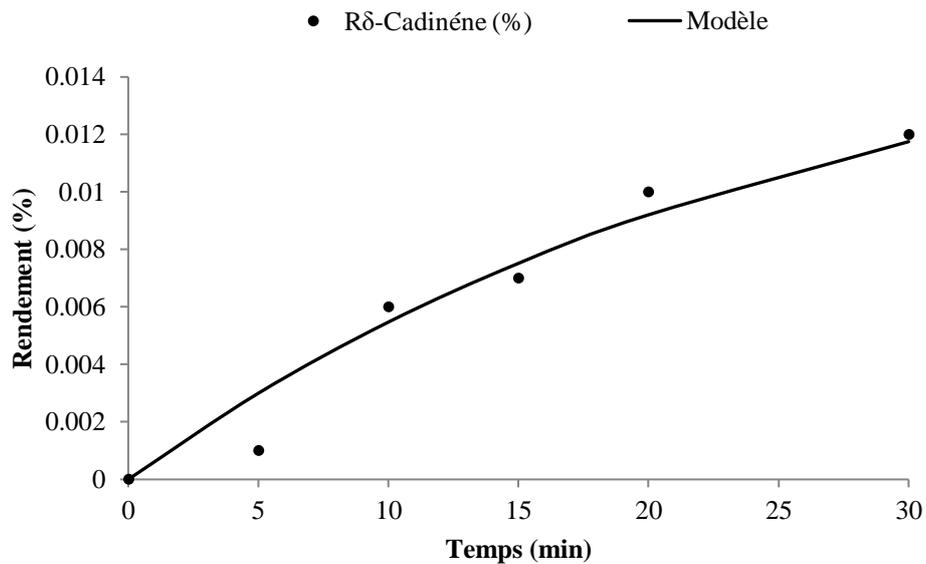


Figure 71: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du δ -cadinéne dans l'huile essentielle de romarin par entrainement à la vapeur d'eau

Les paramètres du modèle de 1^{er} ordre pour chaque constituant sont donnés dans le tableau 47 :

Tableau 47: Paramètres du modèle de 1er ordre

	y_{∞} (g/gs)	k (min^{-1})	R^2
1,8-Cinéole	0,4121	0,6738	0,9999
Camphre	0,1740	0,2443	0,9936
Bornéol	0,0756	0,1520	0,9575
α-Terpinéol	0,0553	0,1510	0,9628
β-Caryophyllène	0,1081	0,0815	0,9265
δ-Cadinène	0,0172	0,0383	0,9541

La modélisation de la cinétique d'extraction des constituants majoritaires a donné d'assez bons résultats particulièrement pour le 1,8-cinéol et le camphre. Nous remarquons aussi que les paramètres du modèle varient d'un constituant à un autre, le 1,8-cinéol a une constante de temps plus grande que celle des autres composés est donc il est extrait plus rapidement du matériel végétal.

On vérifie maintenant la validité du modèle de contribution de composants global et simplifié avec les cinétiques modélisées précédemment :

Tableau 48: Paramètres du modèle GMCC

	$y_{\infty i}$ (g/gs)	k_i (min^{-1})	R^2	g_i %
1,8-Cinéole	0,4121	0,6738	0,9999	34,95
Camphre	0,1740	0,2443	0,9936	14,76
Bornéol	0,0756	0,1520	0,9575	6,41
α-Terpinéol	0,0554	0,1510	0,9628	4,69
β-Caryophyllène	0,1081	0,0815	0,9265	9,17
δ-Cadinène	0,0172	0,0383	0,9541	1,46
Autres	0,3368	0,1653	0,9992	28,56
Total	1,1792	-	-	100,00

Tableau 49: Paramètres du modèle SMCC1

	$y_{\infty i}$ (g/gs)	k_i (min^{-1})	R^2	g_i %
1,8-Cinéole	0,4121	0,6738	0,9999	35,36
Autres	0,7533	0,1580	0,9952	64,64
Total	1,1654	-	-	100,00

Tableau 50: Paramètres du modèle SMCC2

	y_{oi} (g/g)	k_i (min^{-1})	R^2	g_i %
1,8-Cinéole	0,4121	0,6738	0,9999	35,20
Camphre	0,1740	0,2443	0,9936	14,86
Autres	0,5848	0,1381	0,9943	49,94
Total	1,1709	-	-	100,00

La simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de romarin par les trois modèles de contribution de composants est donnée dans la figure 73 :

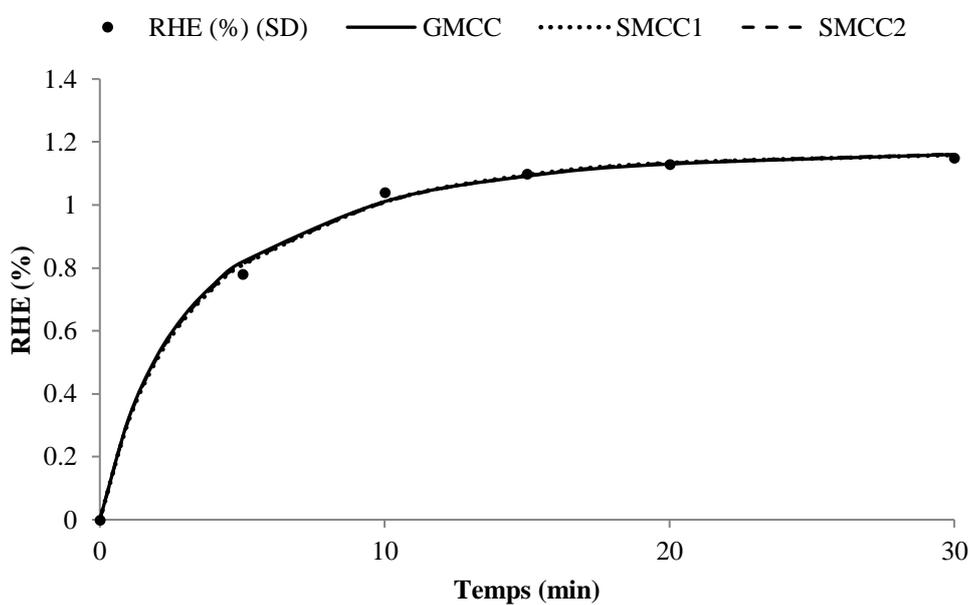


Figure 73: Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de romarin par entraînement à la vapeur d'eau par les modèles GMCC, SMCC1 et SMCC2

Les trois modèles ont donné des résultats proches des points expérimentaux ce qui confirme leur validité dans le cas de l'entraînement à la vapeur d'eau. Aussi ces modèles ont pris en considération les différentes cinétiques des constituants de l'huile essentielle qui influent sur sa cinétique globale.

Nous allons maintenant calculer la concentration en phase vapeur de chaque constituant en fonction du temps à l'aide des paramètres du 1^{er} ordre calculés précédemment :

1,8-Cinéole

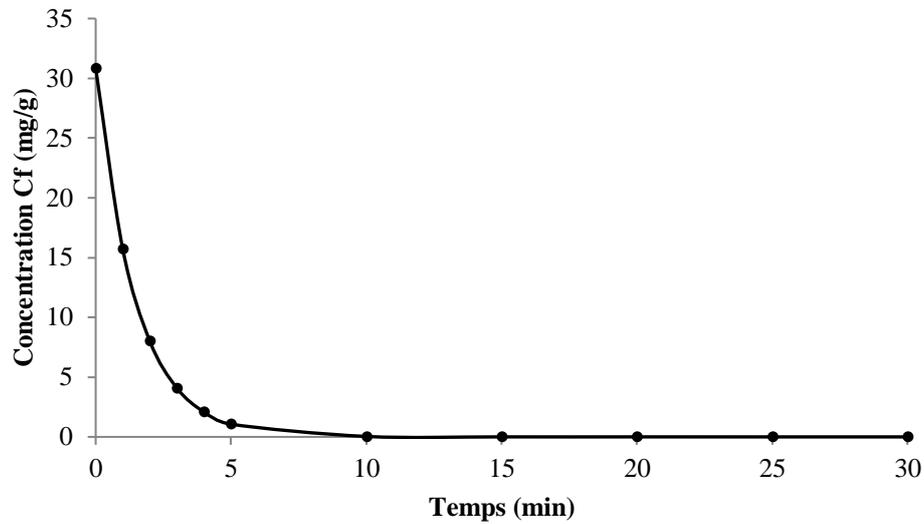


Figure 74: Evolution de la concentration en phase vapeur du 1,8-cinéole dans l'huile essentielle de romarin au cours du temps lors de l'entraînement à la vapeur d'eau

Camphre

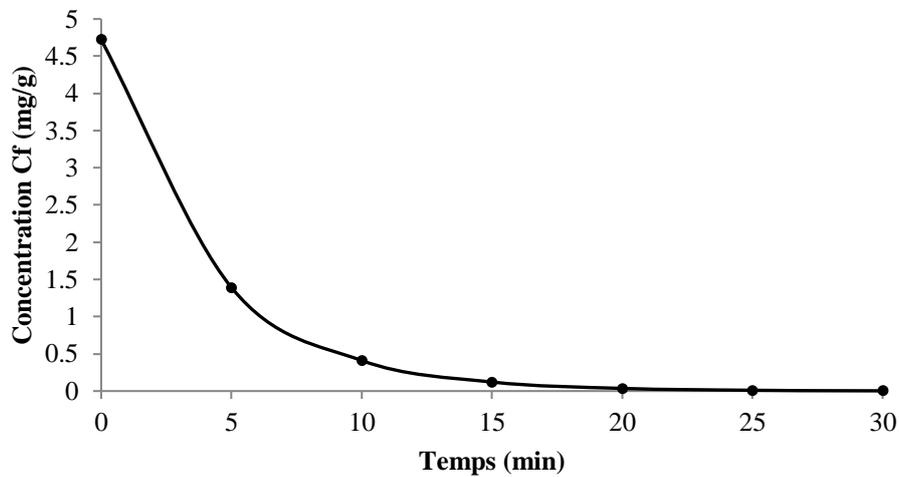


Figure 75: Evolution de la concentration en phase vapeur du camphre dans l'huile essentielle de romarin au cours du temps lors de l'entraînement à la vapeur d'eau

Bornéol

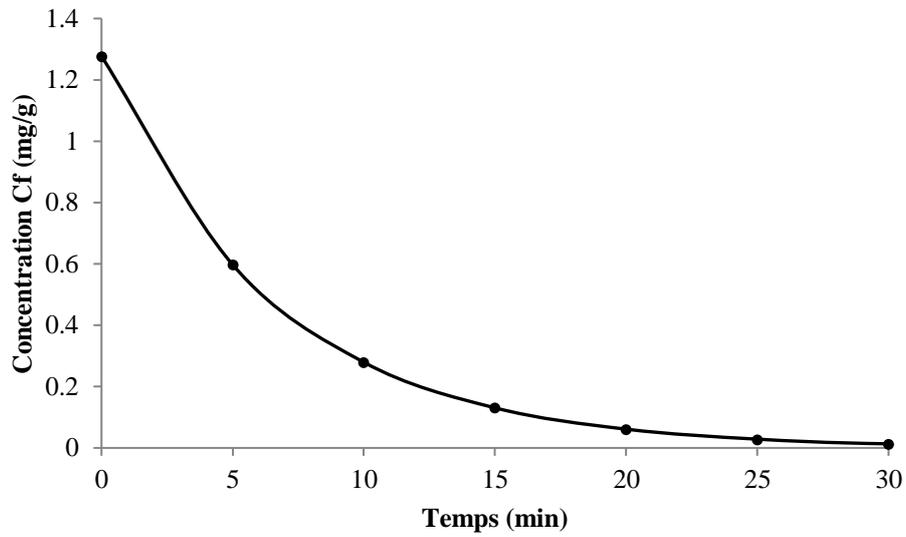


Figure 77: Evolution de la concentration en phase vapeur du bornéol dans l'huile essentielle de romarin au cours du temps lors de l'entraînement à la vapeur d'eau

α -Terpinéol

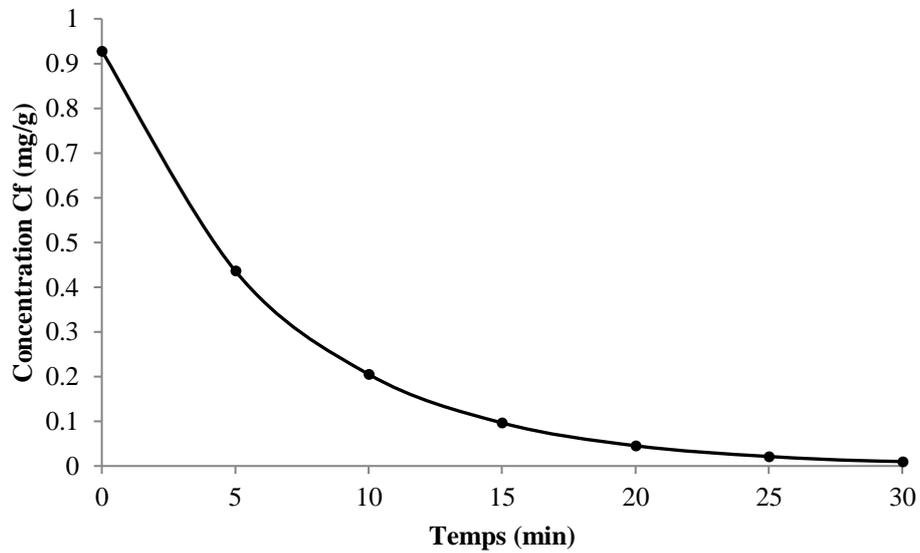


Figure 76: Evolution de la concentration en phase vapeur du α -terpinéol dans l'huile essentielle de romarin au cours du temps lors de l'entraînement à la vapeur d'eau

β -Caryophyllène

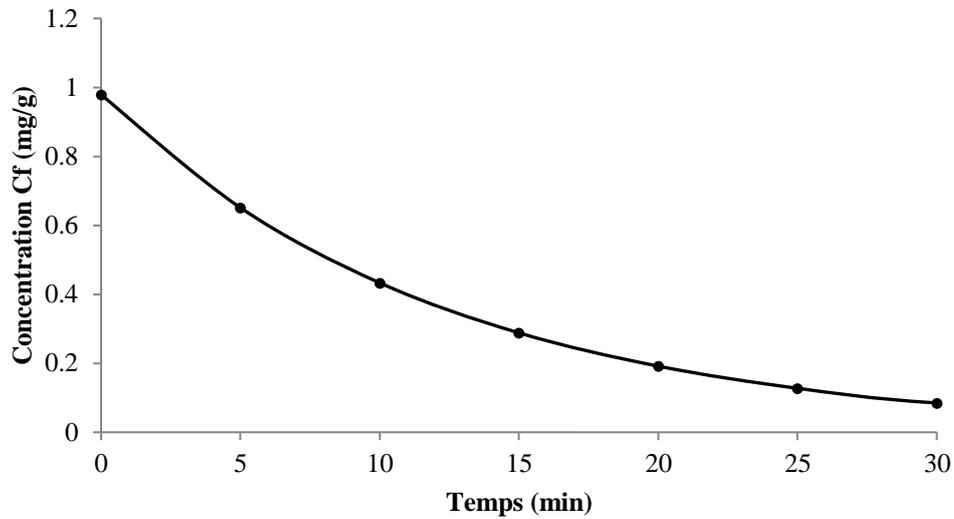


Figure 79: Evolution de la concentration en phase vapeur du β -caryophyllène dans l'huile essentielle de romarin au cours du temps lors de l'entraînement à la vapeur d'eau

δ -Cadinène

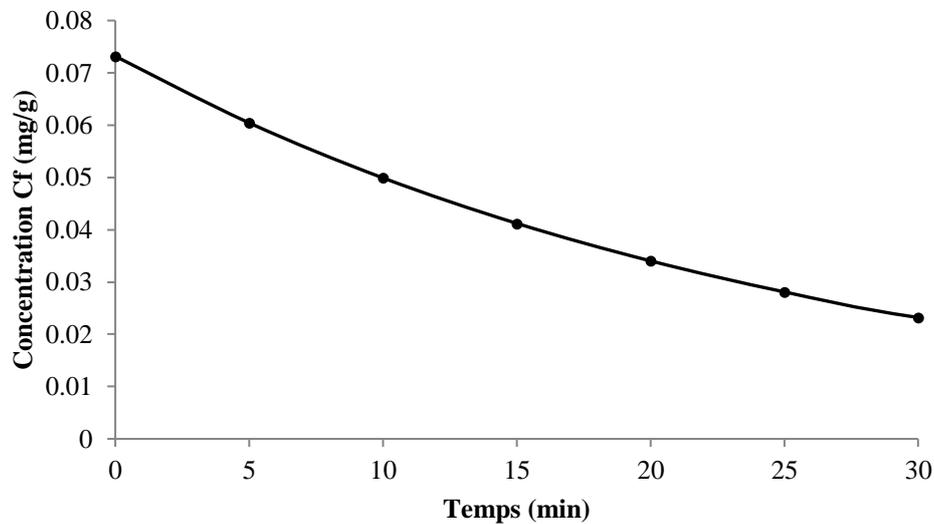


Figure 78: Evolution de la concentration en phase vapeur du δ -cadinène dans l'huile essentielle de romarin au cours du temps lors de l'entraînement à la vapeur d'eau

La concentration de tous les constituants est maximale au début de l'extraction puis diminue rapidement (1,8-cinéol, camphre) ou progressivement (le reste des composés) avec le temps. La vitesse de diminution de la concentration de chaque composé correspond à la vitesse de son extraction.

Le modèle de premier ordre a aussi été appliqué à la cinétique d'extraction des constituants majoritaires de l'huile essentielle de romarin par hydrodistillation :

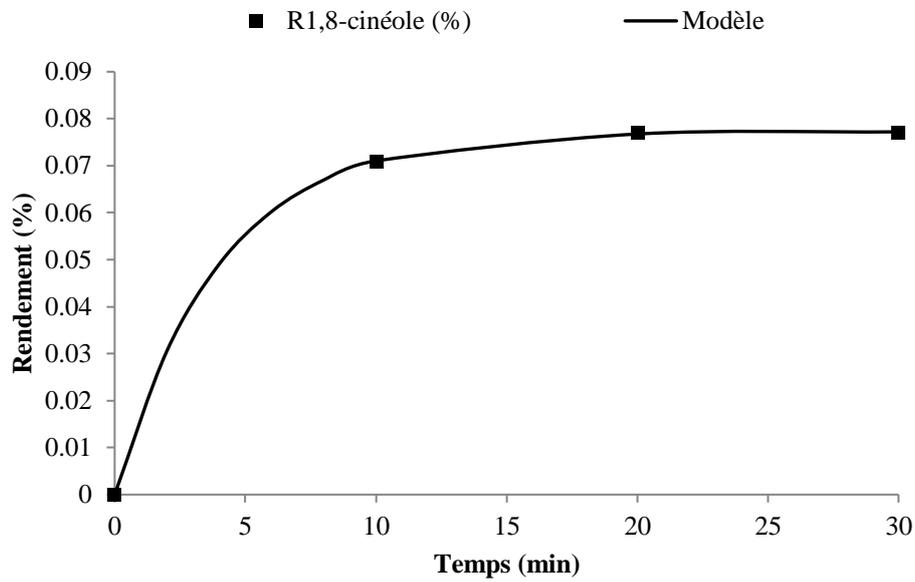


Figure 80: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du 1,8-cinéole dans l'huile essentielle de romarin par hydrodistillation

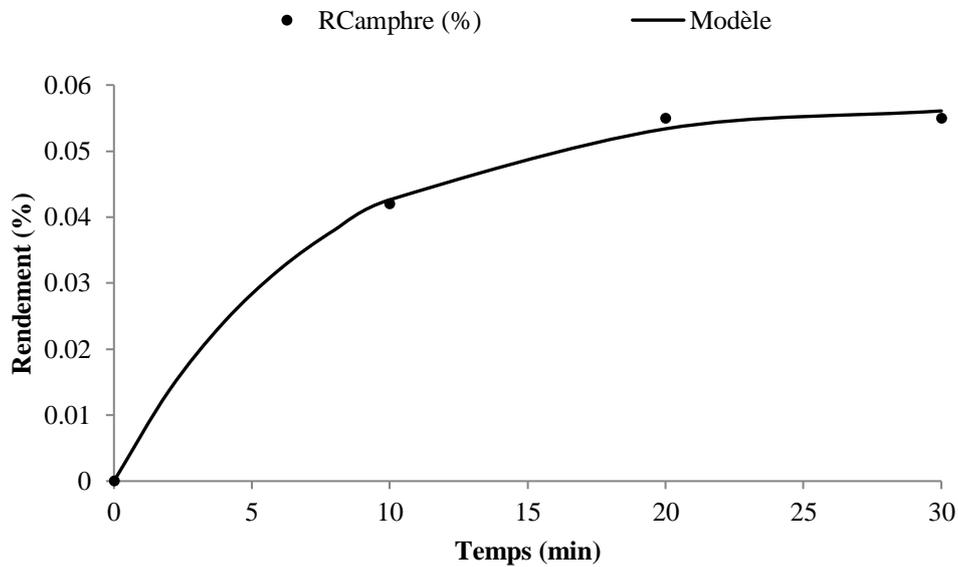


Figure 81: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du camphre dans l'huile essentielle de romarin par hydrodistillation

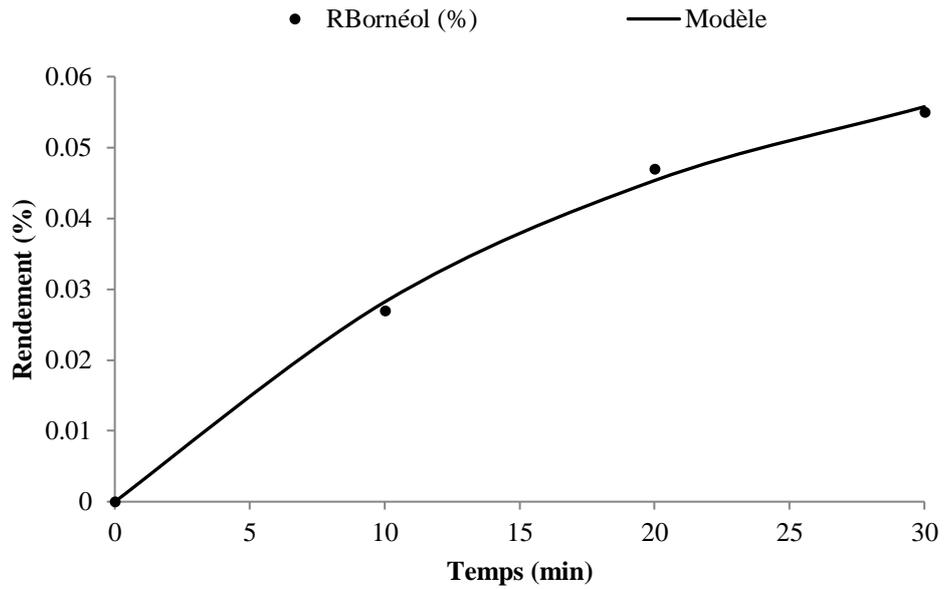


Figure 82: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du bornéol dans l'huile essentielle de romarin par hydrodistillation

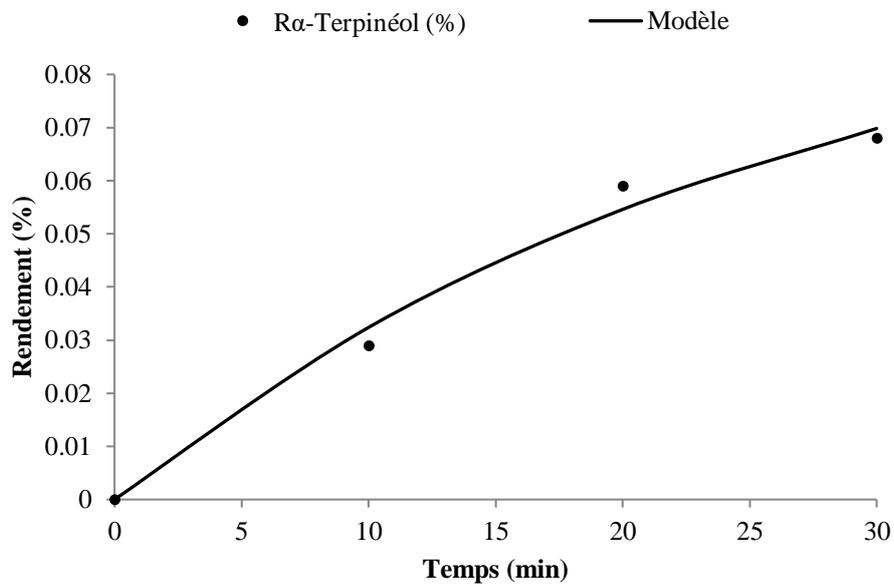


Figure 83: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du α -terpinéol dans l'huile essentielle de romarin par hydrodistillation

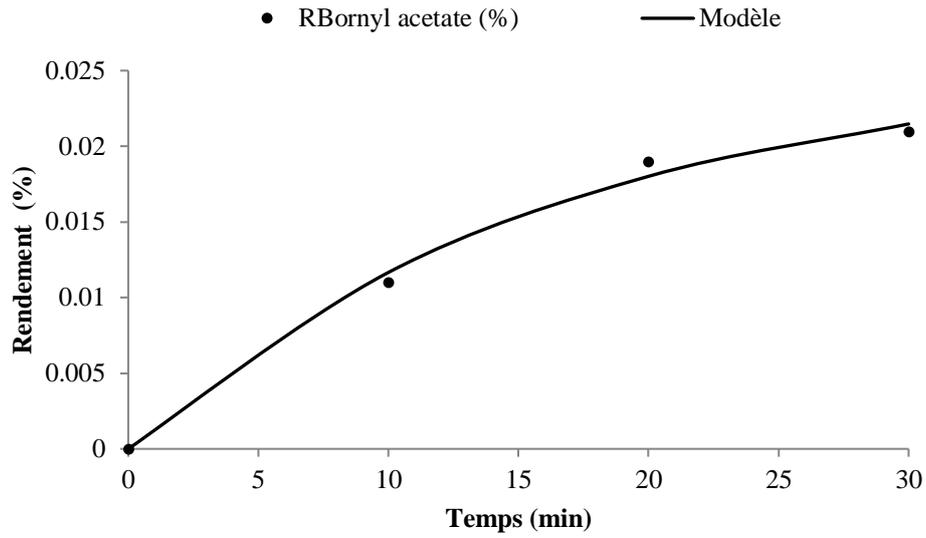


Figure 84: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du bornyl acétate dans l'huile essentielle de romarin par hydrodistillation

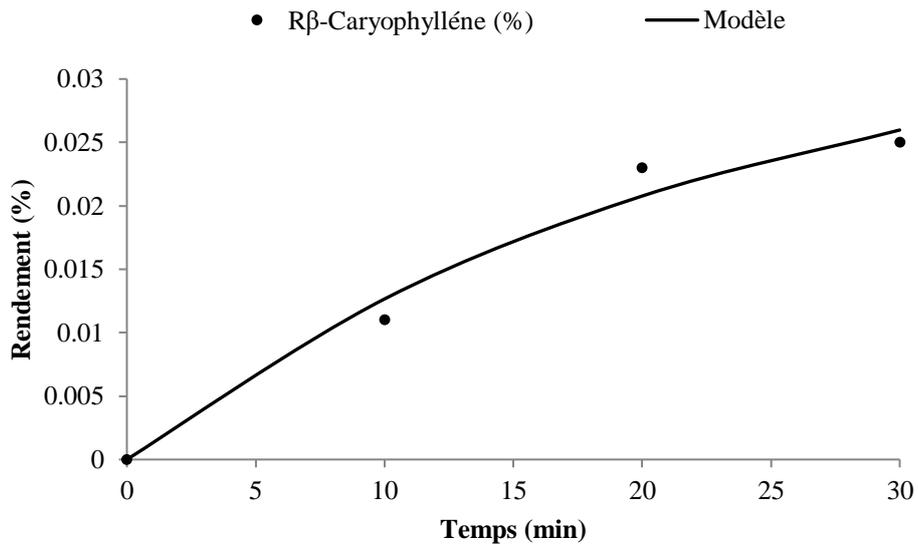


Figure 85: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du β-caryophyllène dans l'huile essentielle de romarin par hydrodistillation

Les paramètres du modèle de 1^{er} ordre pour chaque constituant sont donnés dans le tableau 51 :

Tableau 51: Paramètres du modèle de 1er ordre

	y_{∞} (g/gs)	k (min ⁻¹)	R^2
1,8-Cinéole	0,0772	0,2519	1,0000
Camphre	0,0570	0,1377	0,9979
Bornéol	0,0719	0,0498	0,9974
α-Terpinéol	0,1031	0,0377	0,9881
Bornyl acétate	0,0256	0,0607	0,9940
β-Caryophyllène	0,0353	0,0444	0,9786

L'application du modèle de 1^{er} ordre à la cinétique d'extraction des constituants majoritaires a donné de bons résultats. Nous pouvons dire aussi que les paramètres du modèle varient d'un constituant à un autre, le 1,8-cinéol et le camphre ont des constantes de temps plus grandes que celle des autres composés est donc ils sont extraits plus rapidement du matériel végétal. La composition de l'huile essentielle change aussi au cours de l'extraction, au début le camphre était le deuxième composé majoritaire et le α -Terpinéol était le troisième, mais à la fin de l'opération, le α -Terpinéol est devenu le deuxième composé majoritaire alors que le camphre est le troisième avec le bornéol. Ce changement de composition et de propriétés cinétiques nous permet de s'interroger sur la validité des modèles supposant l'huile essentielle en tant que pseudo-composant aux propriétés constantes dans le temps.

On vérifie maintenant la validité du modèle de contribution de constituants global et simplifié avec les cinétiques modélisées précédemment :

Tableau 52: Paramètres du modèle GMCC

	$y_{\infty i}$ (g/gs)	k_i (min ⁻¹)	R^2	g_i %
1,8-Cinéole	0,0773	0,2519	1,0000	3,66
Camphre	0,0570	0,1377	0,9979	2,70
Bornéol	0,0719	0,0498	0,9974	3,41
α-Terpinéol	0,1031	0,0377	0,9881	4,88
Bornyl acétate	0,0256	0,0607	0,994	1,21
β-Caryophyllène	0,0353	0,0444	0,9786	1,67
Autres	1,7410	0,0016	0,9666	82,47
Total	2,1112	-	-	100,00

Tableau 53: Paramètres du modèle SMCC1

	$y_{\infty i}$ (g/gs)	k_i (min ⁻¹)	R^2	g_i %
1,8-Cinéole	0,0773	0,2519	1,0000	13,91
Autres	0,4782	0,0361	0,9983	86,09
Total	0,5555	-	-	100,00

Tableau 54: Paramètres du modèle SMCC2

	$y_{\infty i}$ (g/g)	k_i (min^{-1})	R^2	g_i %
1,8-Cinéole	0,0773	0,2519	1,0000	13,90
α-Terpinéol	0,1031	0,0377	0,9881	18,55
Autres	0,3755	0,0355	0,9995	67,55
Total	0,5559	-	-	100,00

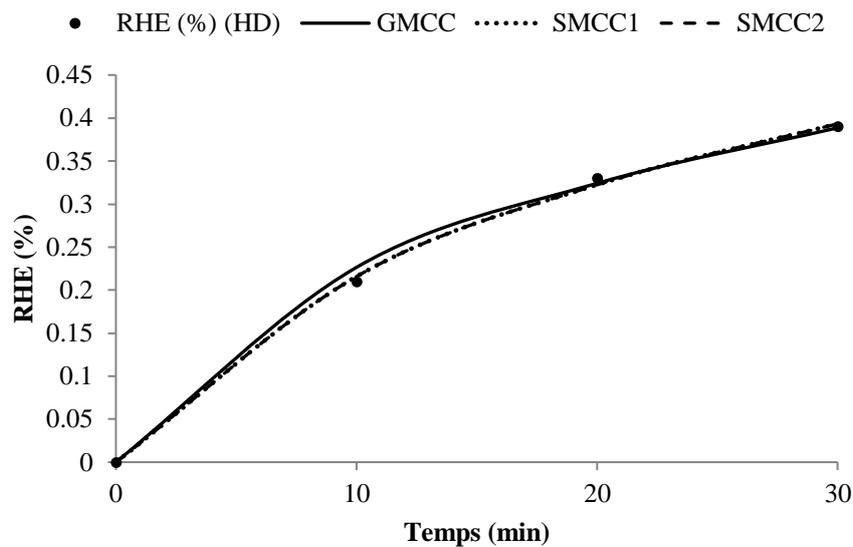


Figure 86: Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de romarin par hydrodistillation par les modèles GMCC, SMCC1 et SMCC2

Les trois modèles ont donné des résultats assez proches des points expérimentaux ce qui confirme leur validité dans le cas de l'hydrodistillation. Aussi contrairement aux modèles supposant l'huile essentielle comme un pseudo-composant, ces modèles ont pris en considération les différentes cinétiques des constituants de l'huile essentielle et le changement de composition au cours de l'extraction.

La simulation de la concentration en phase vapeur des constituants majoritaires de l'huile essentielle de romarin lors de l'extraction par hydrodistillation est donnée dans les figures 87-92 :

1,8-Cinéole

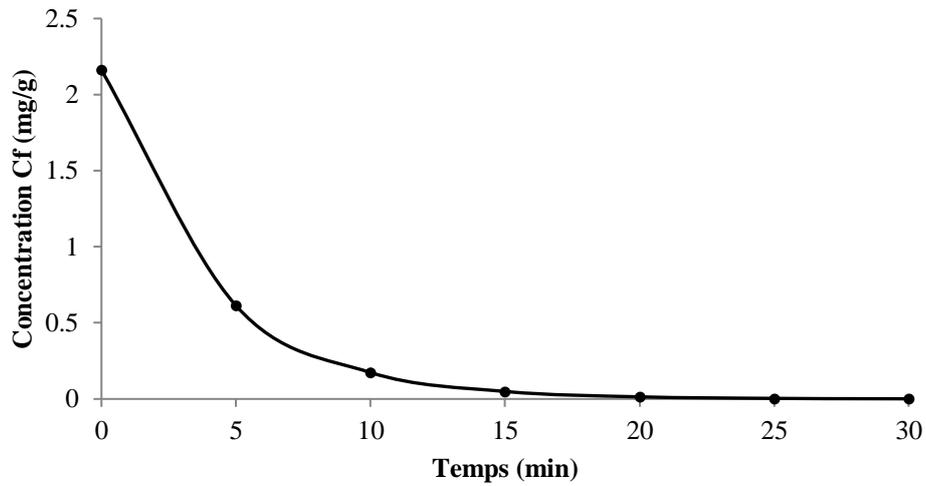


Figure 87: Evolution de la concentration en phase vapeur du 1,8-cinéole dans l'huile essentielle de romarin au cours du temps lors de l'hydrodistillation

Camphre

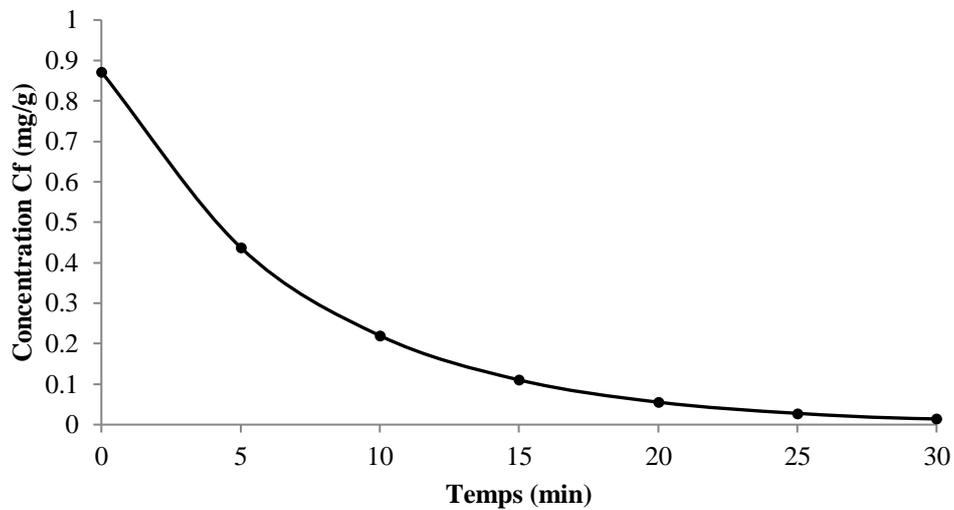


Figure 88: Evolution de la concentration en phase vapeur du camphre dans l'huile essentielle de romarin au cours du temps lors de l'hydrodistillation

Bornéol

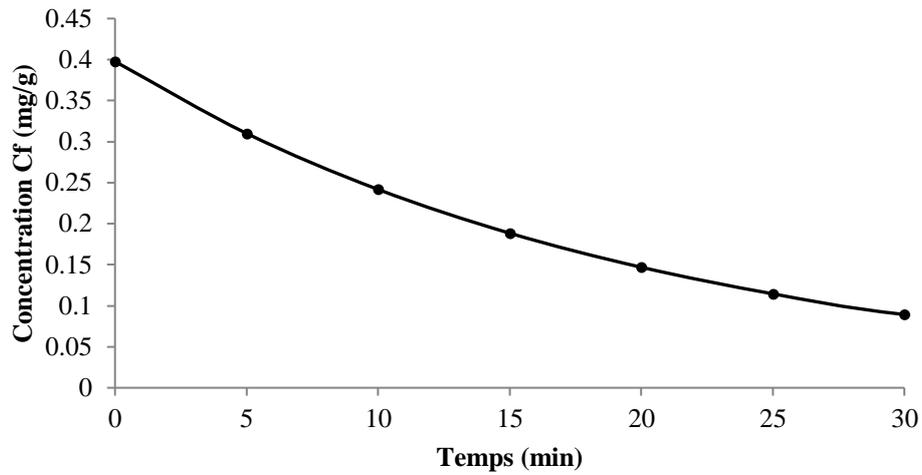


Figure 89: Evolution de la concentration en phase vapeur du bornéol dans l'huile essentielle de romarin au cours du temps lors de l'hydrodistillation

α -Terpinéol

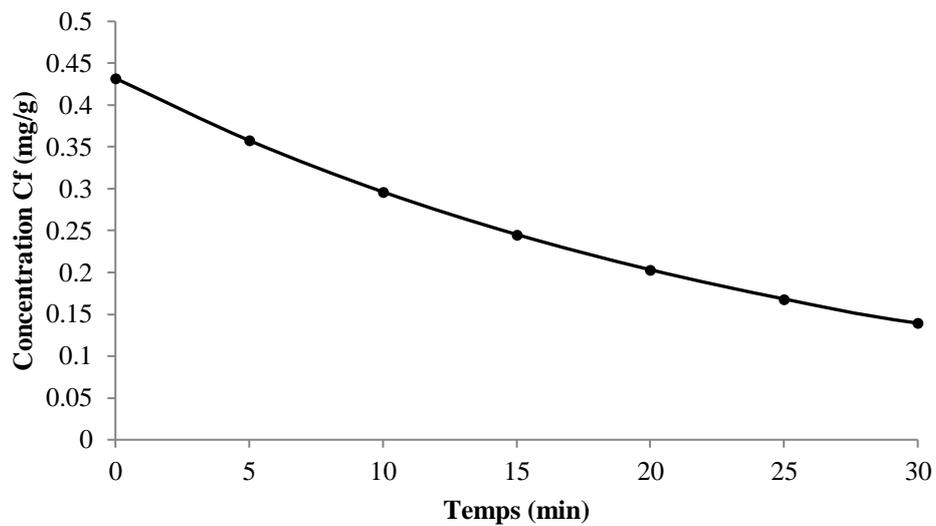


Figure 90: Evolution de la concentration en phase vapeur du α -terpinéol dans l'huile essentielle de romarin au cours du temps lors de l'hydrodistillation

Bornyl acétate

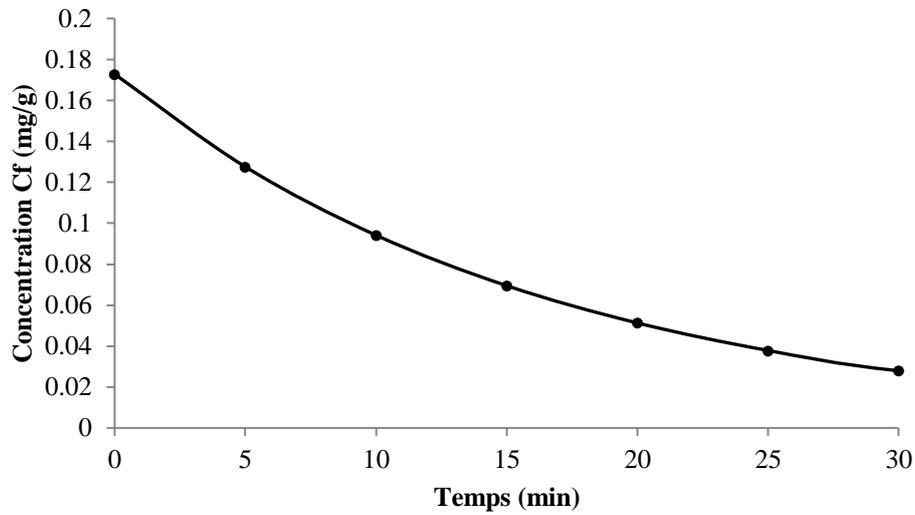


Figure 91: Evolution de la concentration en phase vapeur du bornyl acétate dans l'huile essentielle de romarin au cours du temps lors de l'hydrodistillation

β -Caryophyllène

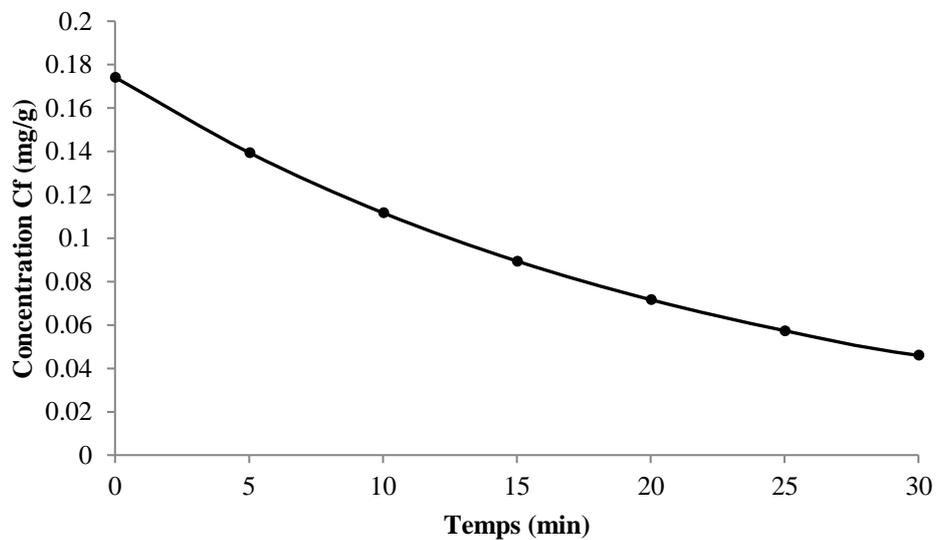


Figure 92: Evolution de la concentration en phase vapeur du β -caryophyllène dans l'huile essentielle de romarin au cours du temps lors de l'hydrodistillation

La concentration de tous les constituants est maximale au début de l'extraction puis diminue rapidement (1,8-cinéol) ou progressivement (le reste des composés) avec le temps.

3.3.2 *Pistacia lentiscus* L. (Pistachier)

3.3.2.1 Huile globale

Les résultats de l'étude cinétique menée par (Nacer-Bey, 2003) sur l'hydrodistillation du lentisque, ont été simulés par le modèle du 1^{er} ordre et représentés sur la figure 93.

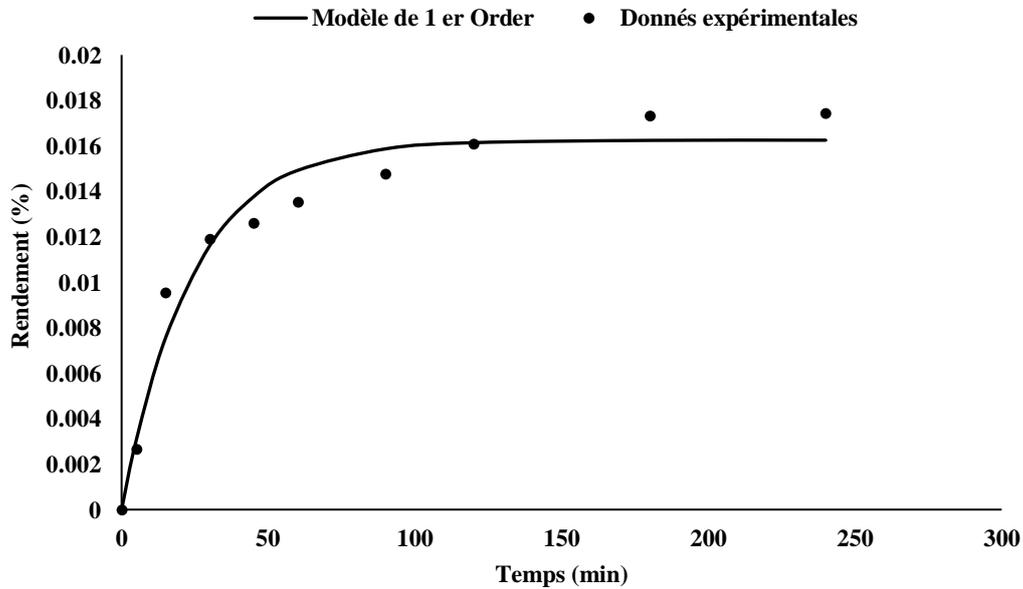


Figure 93 : Application du modèle de 1^{er} ordre à la cinétique d'extraction du pistachier par hydrodistillation (Mebrouk et al., 2013)

Tableau 55 : Paramètres du modèle 1er ordre (Mebrouk et al., 2013)

Y(%)	K (min ⁻¹)	R ²
0.017	0.031	0.951

Nous avons pu calculer l'expression de la concentration en phase vapeur en fonction du temps à partir des paramètres du 1^{er} ordre de l'HE de pistachier, et la représenter sur la figure 94. On note une concentration élevée au début de l'extraction (0,085 mg/g) puis elle diminue jusqu'à atteindre une valeur nulle au bout de 120 minutes.

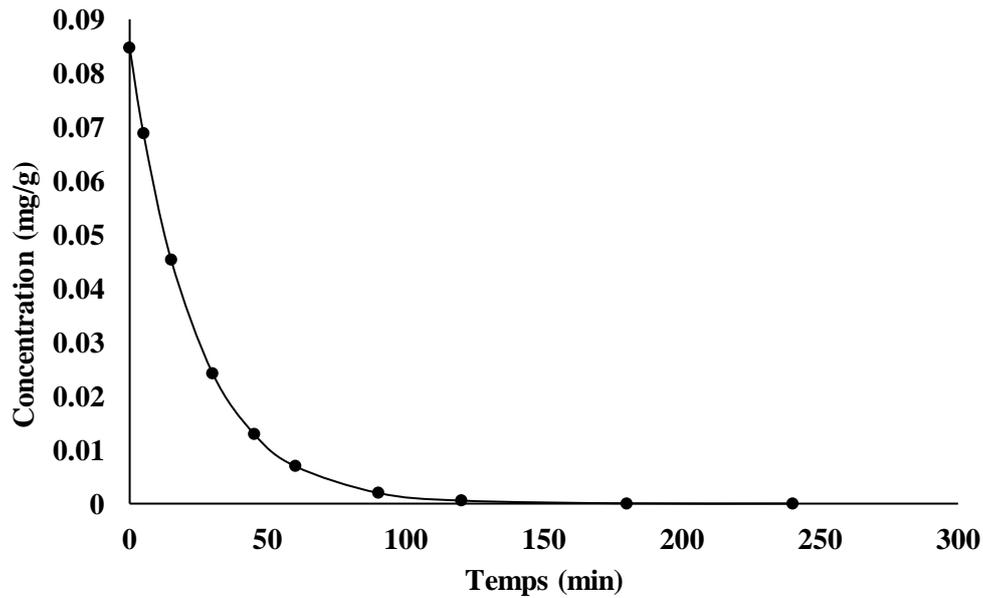


Figure 94 : Simulation de la concentration de l'huile essentielle de pistachier par le modèle de 1^{er} ordre

3.3.3 *Mentha spicata* L. (Menthe verte)

Le modèle de 1^{er} ordre a été appliqué à la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de menthe verte et de ses constituants majoritaires réalisée par Yahiaoui (Yahiaoui, 2005).

3.3.3.1 Huile globale

La simulation des cinétiques d'extraction de l'huile essentielle de menthe verte par modèle du 1^{er} ordre est représentée dans la figure 95. Les paramètres du modèle sont rapportés dans le tableau 56 :

Tableau 56: Paramètres du modèle de 1er ordre

	y_{∞} (g/g)	k (min^{-1})	R^2
$R_{HE}(\%)$ N	0,9549	0,0956	0,9925
$R_{HE}(\%)$ S	0,7515	0,0707	0,9908

Le modèle est en accord avec les points expérimentaux avec un coefficient de régression supérieur à 0,98.

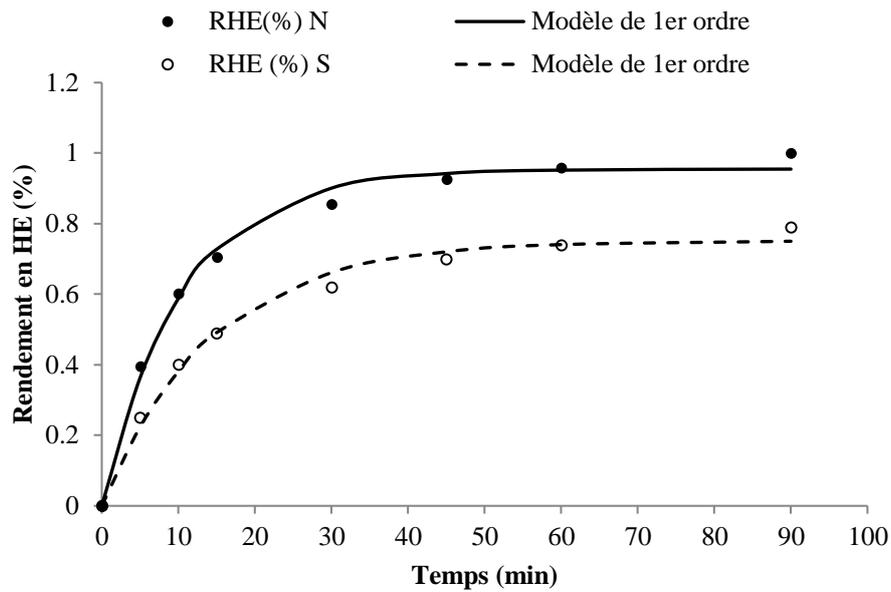


Figure 95: Application du modèle de 1^{er} ordre à la cinétique d'extraction de *Mentha spicata* du nord et du sud d'Algérie au cours de l'hydrodistillation

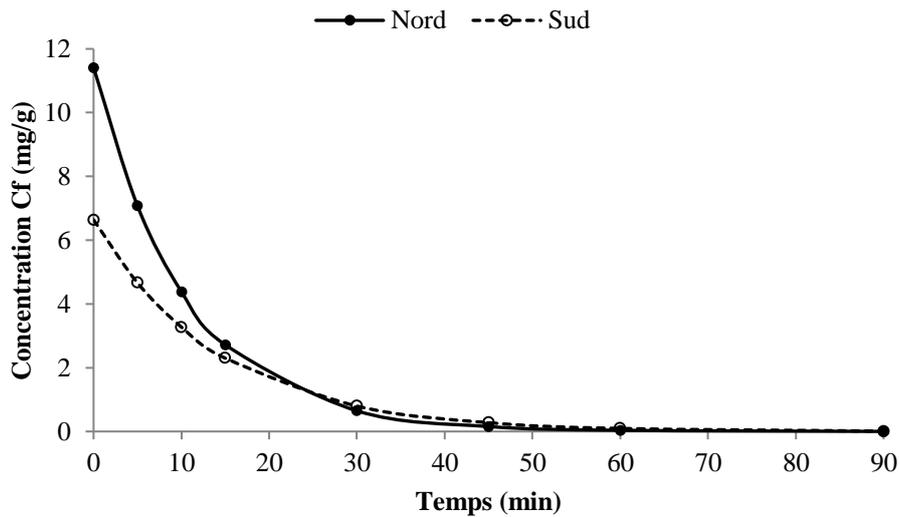


Figure 96: Evolution de la concentration en phase vapeur de l'huile essentielle de menthe verte au cours de l'hydrodistillation

3.3.3.2 Constituants majoritaires

Les résultats de la simulation de la cinétique d'extraction des constituants majoritaires de l'huile de menthe verte par le modèle de 1^{er} ordre sont donnés dans les figures 97-100 :

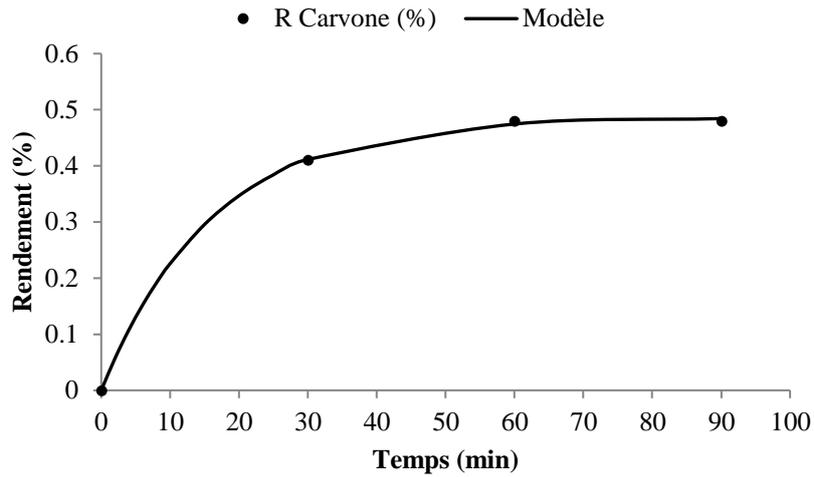


Figure 97: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du carvone dans l'huile essentielle de menthe verte par hydrodistillation

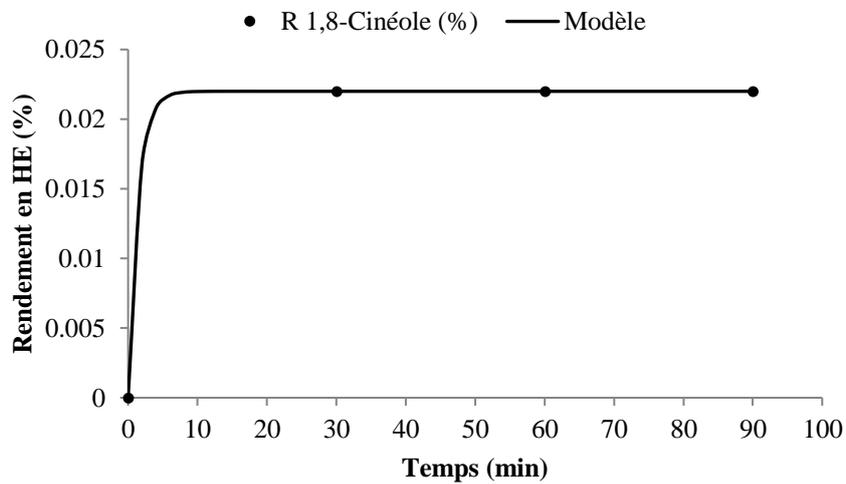


Figure 98: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du 1,8-cinéole dans l'huile essentielle de menthe verte par hydrodistillation

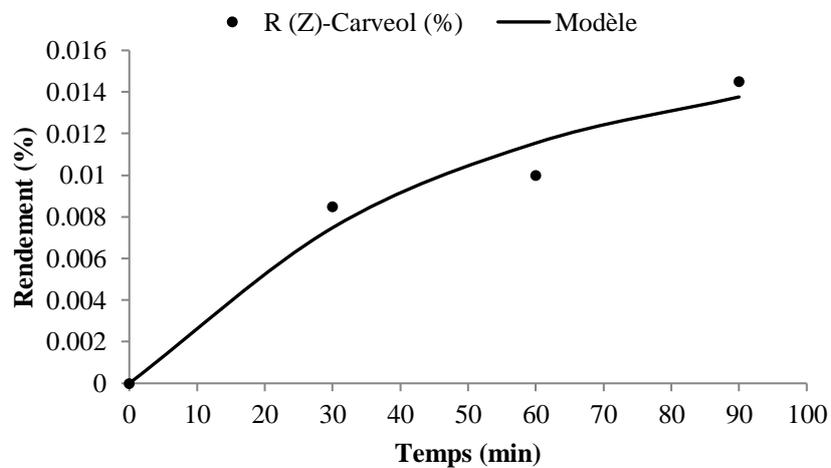


Figure 99: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du (Z)-carvéol dans l'huile essentielle de menthe verte par hydrodistillation

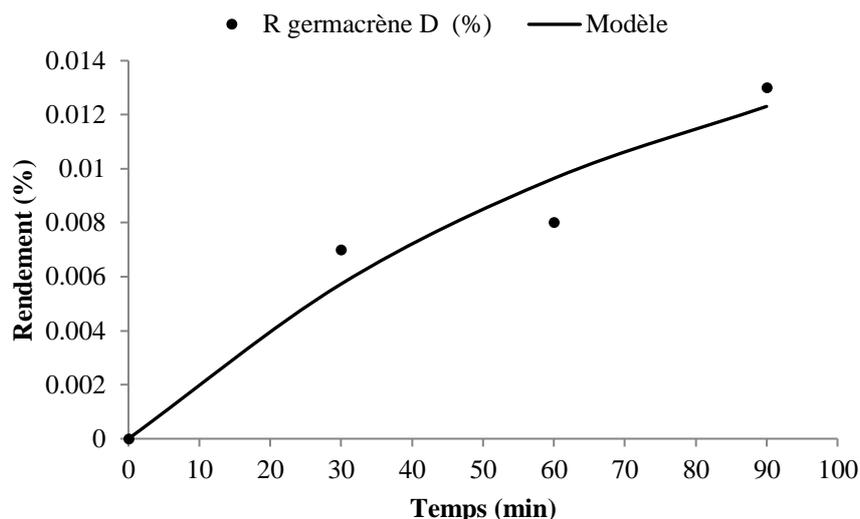


Figure 100: Application du modèle de 1er ordre à la cinétique d'extraction du Germacrène D dans l'huile essentielle de menthe verte par hydrodistillation

Les paramètres du modèle de 1^{er} ordre pour chaque constituant sont donnés dans le tableau 57 :

Tableau 57: Paramètres du modèle de 1er ordre

	y_{∞} (g/g)	k (min^{-1})	R^2
Carvone	0,4860	0,0625	0,9997
1,8-Cinéole	0,0220	0,7194	1,0000
(Z)-Carvéol	0,0164	0,0203	0,9639
Germacrène D	0,0180	0,0128	0,9444

Le modèle appliqué est assez proche des données expérimentales surtout dans le cas du Carvone et du 1,8-cinéole, ce qui confirme que le rendement des constituants suit lui aussi une cinétique de 1^{er} ordre. Le 1,8-cinéole est le 1^{er} constituant extrait de la matière végétale.

On vérifie maintenant la validité du modèle de contribution de constituants global et simplifié avec les cinétiques modélisées précédemment :

Tableau 58: Paramètres du modèle GMCC

	$y_{\infty i}$ (g/g)	k_i (min^{-1})	R^2	g_i (%)
Carvone	0,4860	0,0625	0,9997	49,50
1,8-Cinéole	0,0220	0,7194	1,0000	2,24
(Z)-Carvéol	0,0164	0,0203	0,9639	1,67
Germacrène D	0,0180	0,0128	0,9444	1,84
Autres	0,4393	0,3764	0,9869	44,75
Total	0,9817	-	-	100,00

Tableau 59: Paramètres du modèle SMCC1

	$y_{\infty i}$ (g/g)	k_i (min^{-1})	R^2	g_i (%)
Carvone	0,4860	0,0625	0,9997	48,99
Autres	0,5060	0,0689	0,9966	51,01
Total	0,9920	-	-	100,00

Tableau 60: Paramètres du modèle SMCC2

	$y_{\infty i}$ (g/g)	k_i (min^{-1})	R^2	g_i (%)
Carvone	0,4860	0,0625	0,9997	48,97
1,8-Cinéole	0,0220	0,7194	1,0000	2,22
Autres	0,4844	0,0672	0,9964	48,81
Total	0,9924	-	-	100,00

Le rendement en huile essentielle de menthe verte du nord a été calculé à l'aide des trois modèles. Les résultats sont représentés dans la figure 101 :

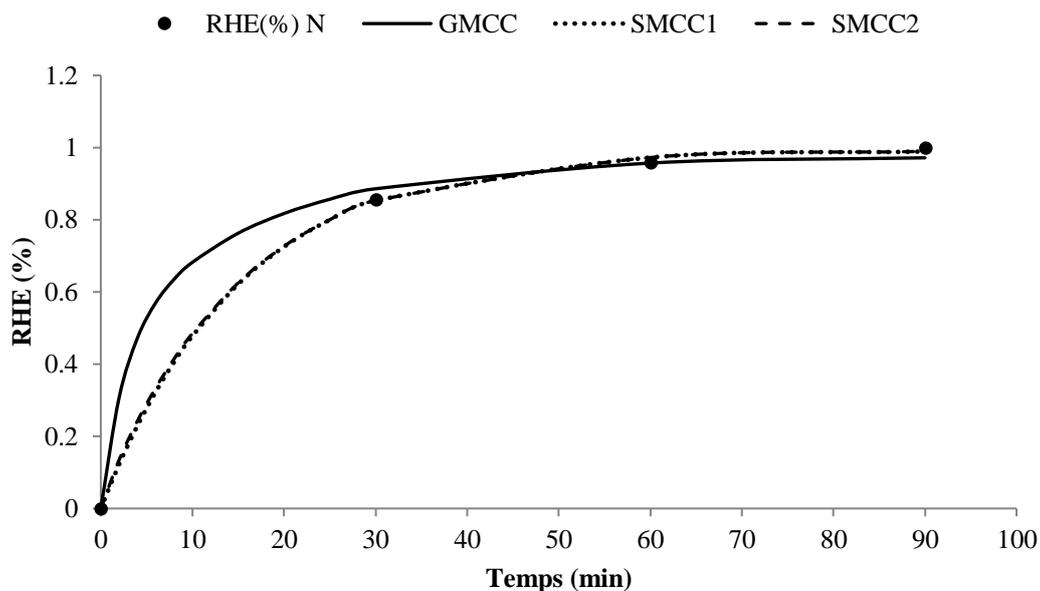


Figure 101: Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de menthe verte par hydrodistillation par les modèles GMCC, SMCC1 et SMCC2

La simulation effectuée par les trois modèles a donné de bons résultats. Les modèles SMCC1 et SMCC2 sont plus proches des valeurs expérimentales ce qui veut dire que la détermination de la cinétique de l'huile essentielle à partir du ou des constituants majoritaires est correcte.

La simulation de la concentration en phase vapeur des constituants majoritaires de l'huile essentielle de menthe verte lors de l'extraction par hydrodistillation est donnée sans les figures 102-105 :

Carvone

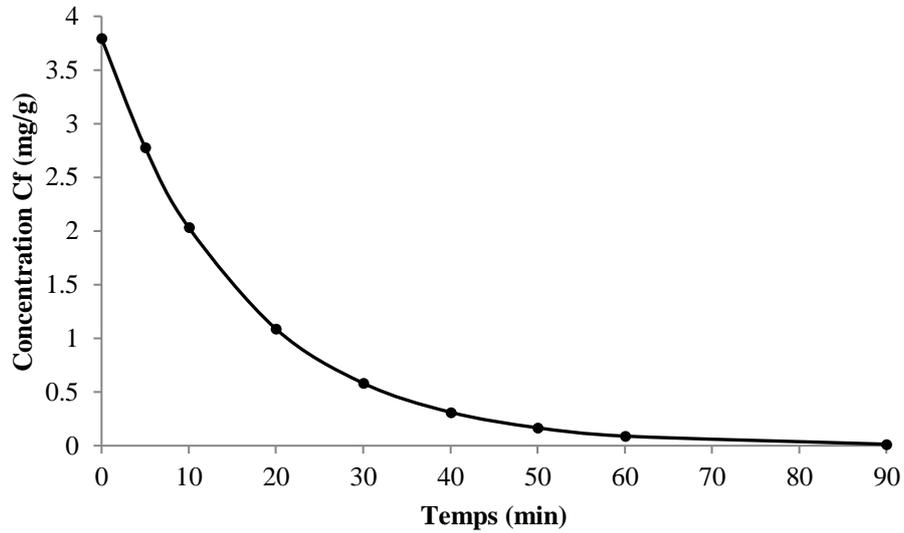


Figure 102: Evolution de la concentration en phase vapeur du carvone au cours de l'hydrodistillation de *Mentha spicata*

1,8-Cinéole

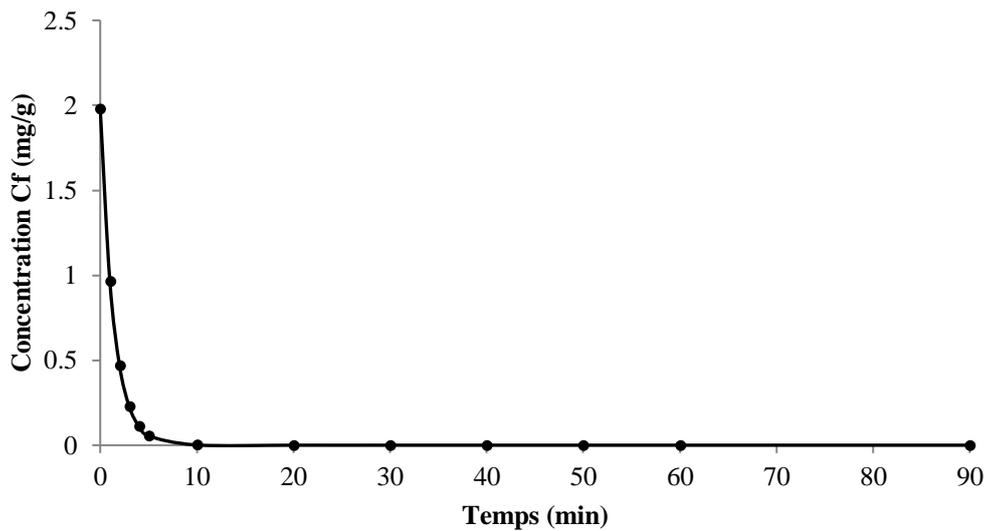


Figure 103: Evolution de la concentration en phase vapeur du 1,8-Cinéole au cours de l'hydrodistillation de *Mentha spicata*

(Z)-Carvéol

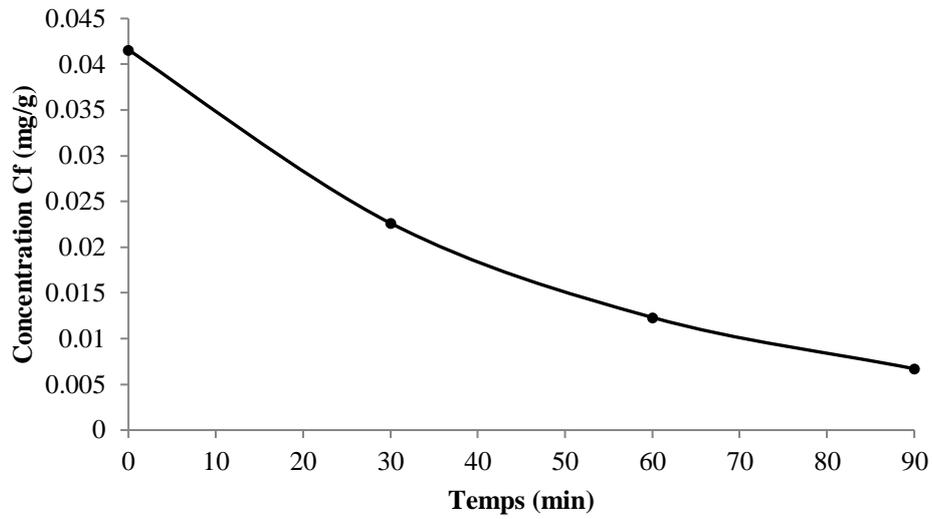


Figure 104: Evolution de la concentration en phase vapeur du (Z)-Carveol au cours de l'hydrodistillation de *Mentha spicata*

Germacrène D

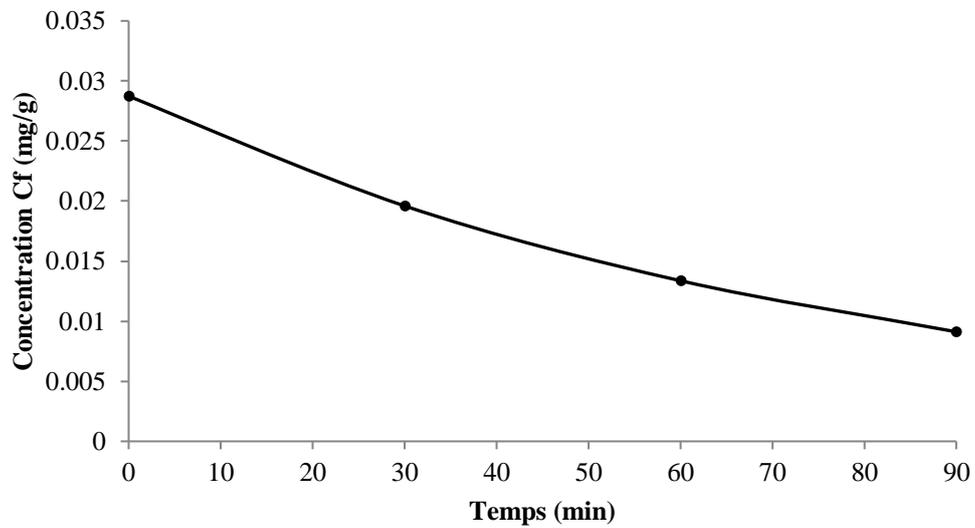


Figure 105: Evolution de la concentration en phase vapeur du germacrène D au cours de l'hydrodistillation de *Mentha spicata*

La concentration de tous les constituants est maximale au début de l'extraction puis diminue rapidement (1,8-cinéol et carvone) ou progressivement (le reste des composés) avec le temps.

3.3.4 *Pimpinella anisum* L. (Anis vert)

3.3.4.1 Huile globale

On a appliqué le modèle du 1^{er} ordre sur la cinétique d'extraction de l'huile essentielle d'anis par hydrodistillation et on a obtenu une courbe passant par la plupart des points expérimentaux avec un coefficient de corrélation R^2 égale à 0.9947 (figure 106).

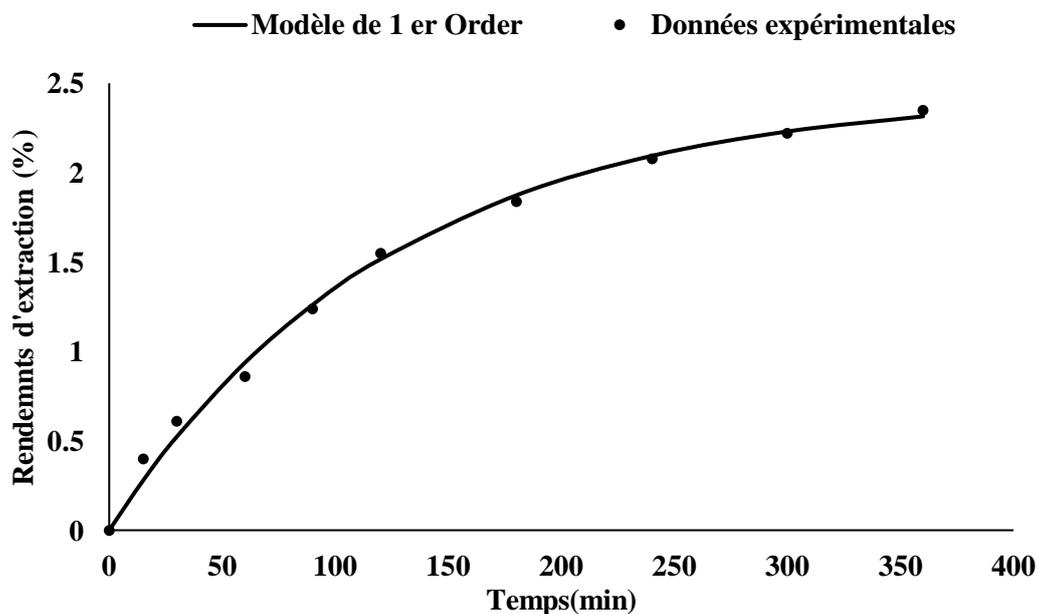


Figure 106 : Application du modèle de 1^{er} ordre à la cinétique d'extraction de l'huile essentielle d'anis par hydrodistillation (Benyoussef et Saïbi, 2013)

Tableau 61 : Paramètres du modèle 1er ordre

Y(%)	K (min ⁻¹)	R ²
2,451	0,00803	0.9947

L'évolution de la concentration de l'HE de *Pimpinella anisum* en phase vapeur en fonction du temps est représentée sur la figure 107. D'après cette figure nous remarquons une diminution progressive de la concentration.

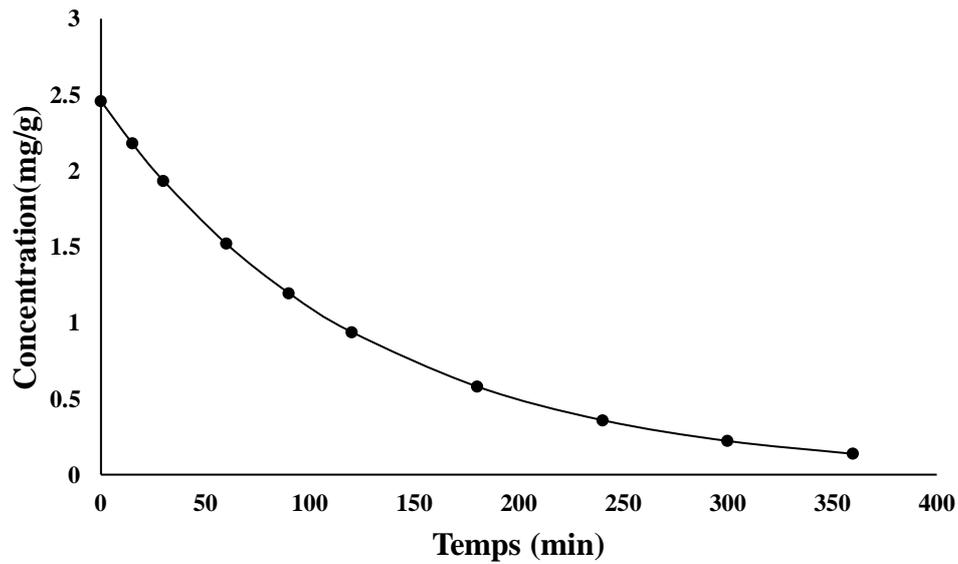


Figure 107 : Simulation de la concentration de l'huile essentielle d'anis par le modèle de 1^{er} ordre

3.3.4.2 Constituants majoritaires

L'évolution du rendement des différents constituants de *Pimpinella anisum* lors de l'hydrodistillation est représentée dans les figures 108, 109, 110 et 111 :

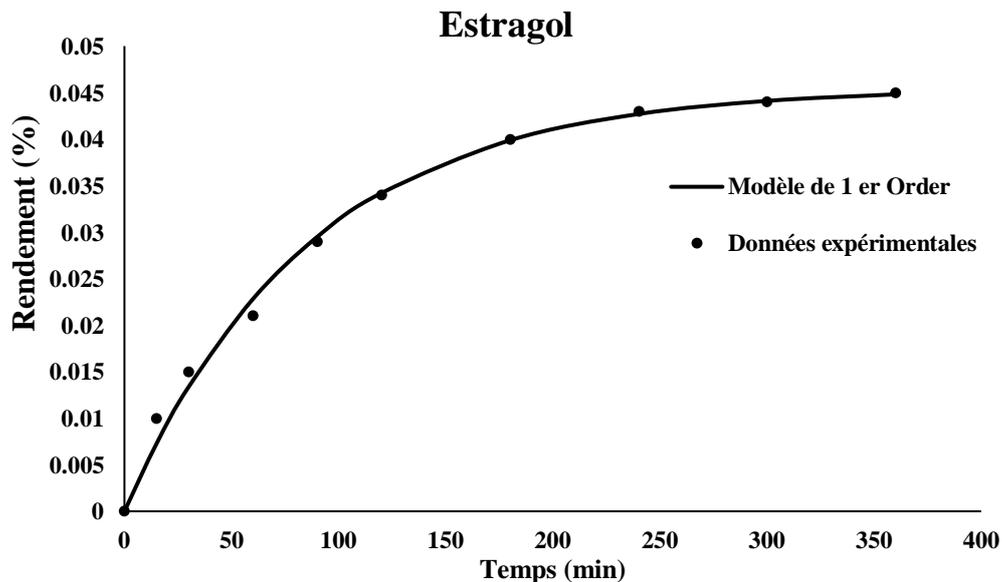


Figure 108 : Simulation de la cinétique d'extraction de l'estragol par le modèle du 1^{er} ordre (Benyoussef et Saïbi, 2013)

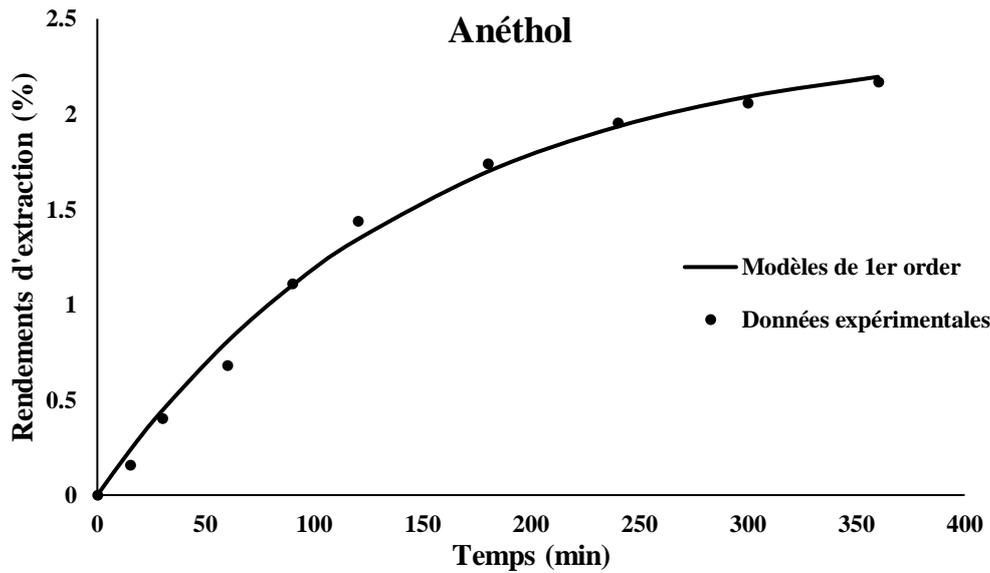


Figure 109 : Simulation de la cinétique d'extraction de l'anéthol par le modèle du 1^{er} ordre (Benyoussef et Saibi, 2013)

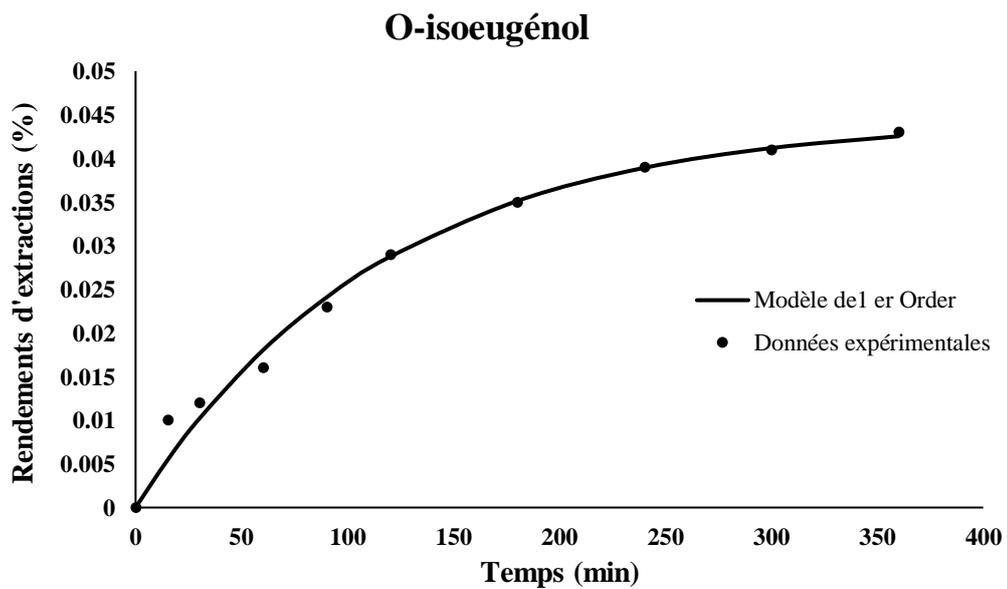


Figure 110 : Simulation de la cinétique d'extraction de l'o-isoeugénol par le modèle du 1^{er} ordre (Benyoussef et Saibi, 2013)

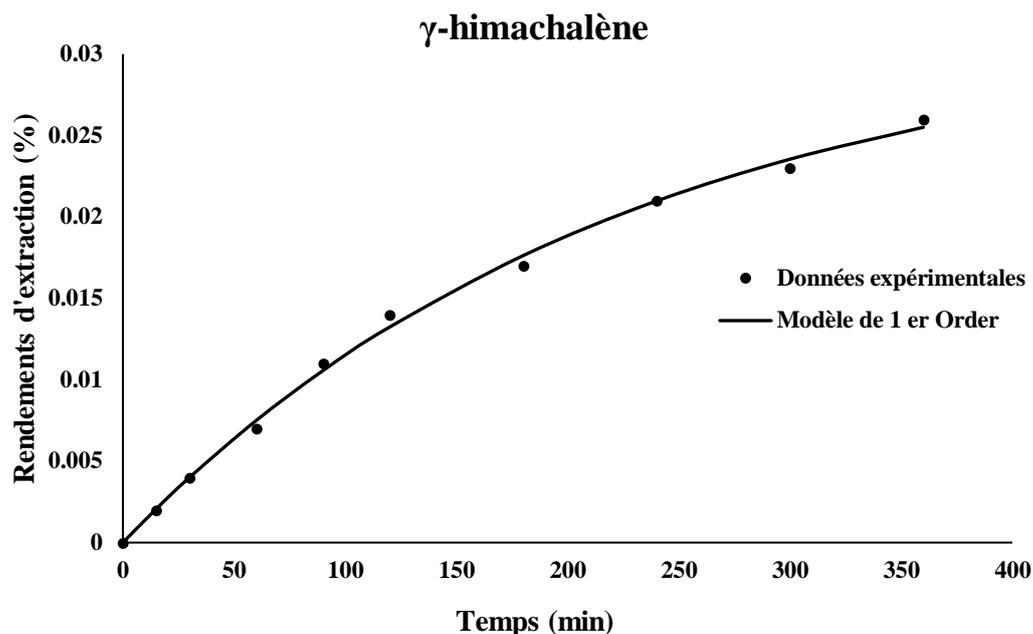


Figure 111 : Simulation de la cinétique d'extraction du γ -himachalène par le modèle du 1^{er} ordre (Benyoussef et Saibi, 2013)

D'après ces figures et le tableau 62, le modèle du premier ordre simule parfaitement les cinétiques des constituants (coefficient de corrélation R^2 supérieurs à 0.98) de *Pimpinella anisum*.

On vérifie maintenant la validité du modèle de contribution de constituants global et simplifié avec les cinétiques modélisées précédemment (figure 112) :

Tableau 62: Paramètres du modèle GMCC (Benyoussef et Saibi, 2013)

Composés	Y(%)	K (min ⁻¹)	R ²	gi (%)
Estragol	0.046	0.019	0.996	2
Anéthol	2.317	0.0079	0.994	94
O-isoeugenol	0.046	0.008	0.988	2
γ -himachalène	0.032	0.0044	0.997	1
Total	0,2441	-	-	100

Tableau 63: Paramètres du modèle SMCC1 (Benyoussef et Saibi, 2013)

Composés	Y(%)	k (min ⁻¹)	R ²	gi (%)
Trans-Anethole	2.317	0.0079	0.994	95
Autres	0.141	0.008	0.988	6
Total	2.458	-	-	100

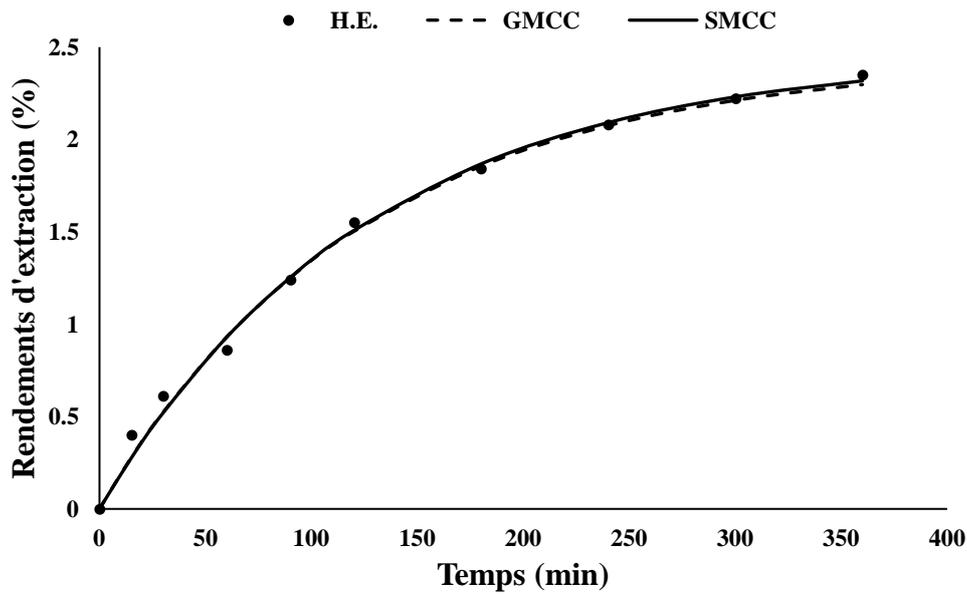


Figure 112 : Simulation du rendement en huile essentielle d'anis lors de l'extraction par hydrodistillation par les modèles GMCC et SMCC (Benyoussef et Saïbi, 2013)

Ces courbes nous permettent de dire que la simulation effectuée par les deux modèles qui ont pris en compte les différentes cinétiques des constituants de l'huile essentielle dans le cas d'hydrodistillation donne des bons résultats.

Les figures 113, 114, 115 et 116 donnent la simulation de la concentration en phase vapeur des constituants majoritaires de l'huile essentielle d'anis vert lors de l'hydrodistillation. D'après ces courbes, la concentration des constituants majoritaires d'anis est maximale au début, puis diminue progressivement au cours du temps.

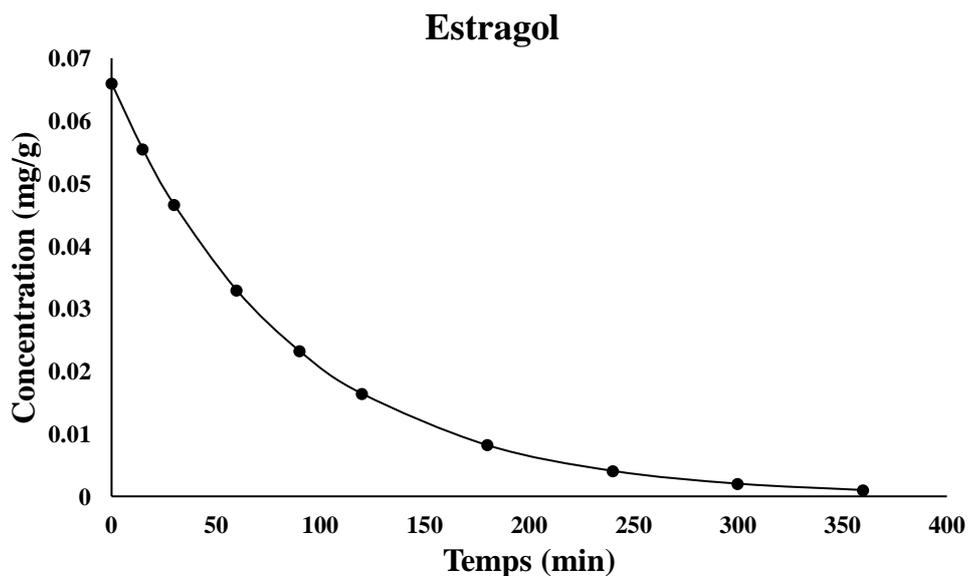


Figure 113 : Simulation de la concentration de l'estragol par le modèle de 1^{er} ordre

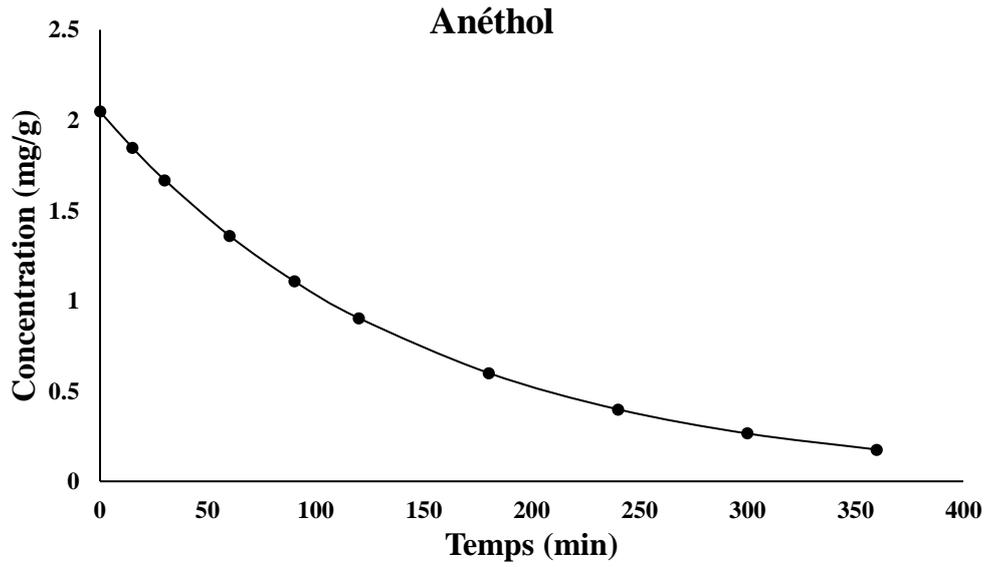


Figure 114 : Simulation de la concentration de l'anéthol par le modèle de 1^{er} ordre.

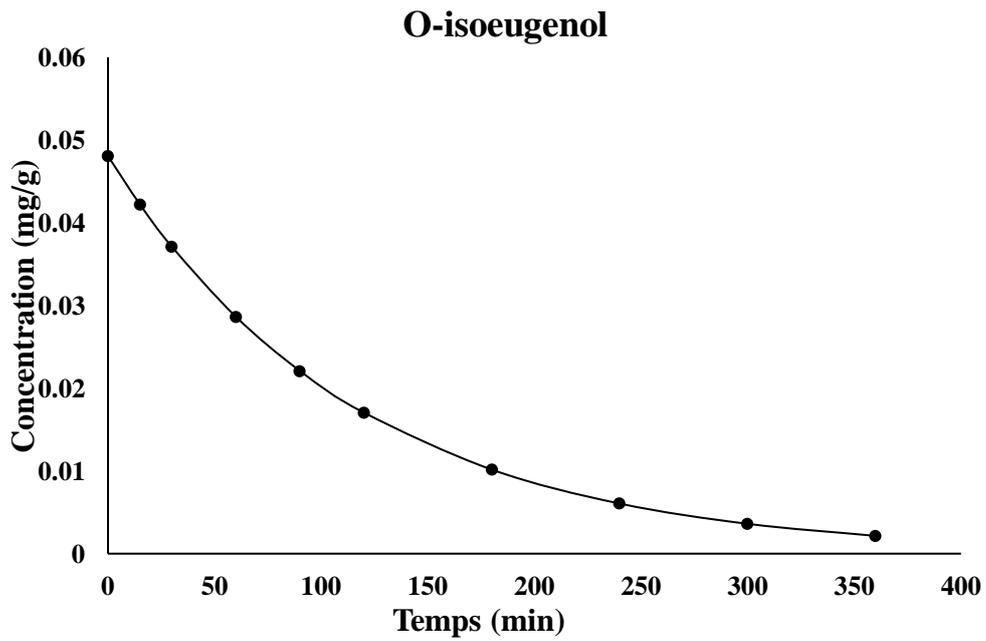


Figure 115 : Simulation de la concentration de l'o-isoeugénol par le modèle de 1^{er} ordre.

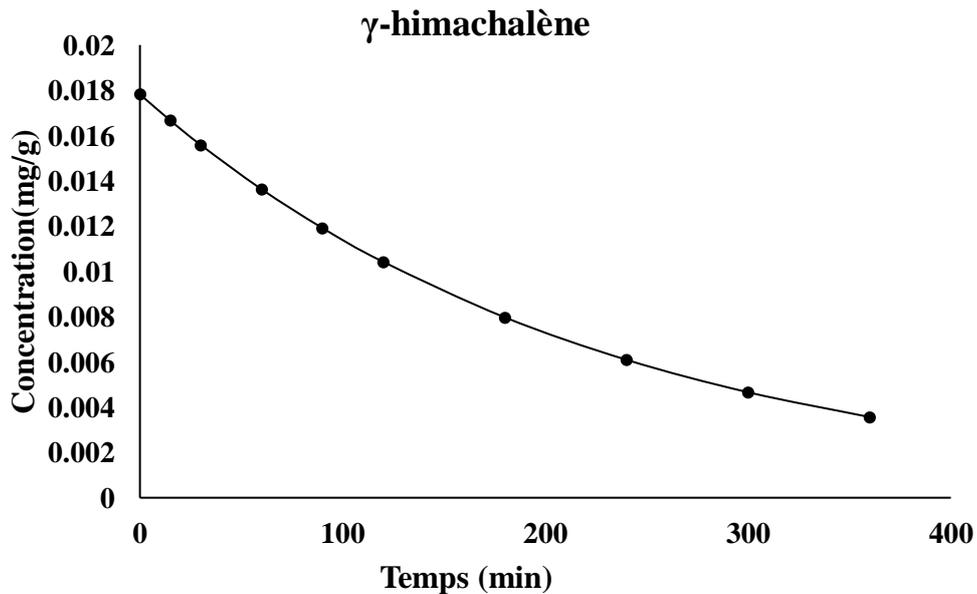


Figure 116 : Simulation de la concentration du γ -himachalène par le modèle de 1^{er} ordre.

3.4 Etude par plans d'expériences

3.4.1 *Rosmarinus officinalis* L. (Romarin)

3.4.1.1 Plan factoriel 2² : Variation des effets sur la concentration au cours du temps

Nous savons déjà que la masse de la matière végétale et le débit du distillat avaient un effet sur le rendement et la concentration de l'huile essentielle lors de l'extraction. Cependant, comment varient ces effets sur la concentration en fonction du temps ?

Nous avons exploité les résultats de l'étude par plans factoriels 2³ réalisée par Boutekedjiret (Boutekedjiret, 1999) pour construire un nouveau plan factoriel 2² prenant en considération uniquement deux variables, la masse et le débit du distillat, et s'intéressant à l'influence de ces variables sur la concentration en phase vapeur de l'huile essentielle de romarin lors de son extraction par entraînement à la vapeur d'eau.

Fixons le domaine de variation des paramètres opératoires choisis comme le montre le tableau 64 :

Tableau 64: Domaine d'étude

Variables expérimentales	Niveau inférieur	Niveau supérieur
Masse du végétal M_v (g)	100	300
Débit de distillat Q_v (ml/min)	10	30

Nous obtenons quatre expériences en faisant varier les deux paramètres. Les coordonnées réelles et centrées réduites du système sont données dans le tableau 65 :

Tableau 65: Coordonnées réelles et centrées réduites du plan factoriel 2²

Expérience	Coordonnées réelles		Coordonnées centrées réduites	
	Mv (g)	Qv (ml/min)	X ₁	X ₂
I	100	10	-1	-1
II	300	10	1	-1
III	100	30	-1	1
IV	300	30	1	1

La concentration a été calculée précédemment à partir des paramètres du modèle de premier ordre et les conditions opératoires et représentée dans la figure 117. A chaque instant (5, 10, 15, 20, 25, 30 minutes) nous construisons un plan factoriel 2² ayant comme réponse les concentrations de l'huile essentielle dans chaque expérience correspondantes à cet instant.

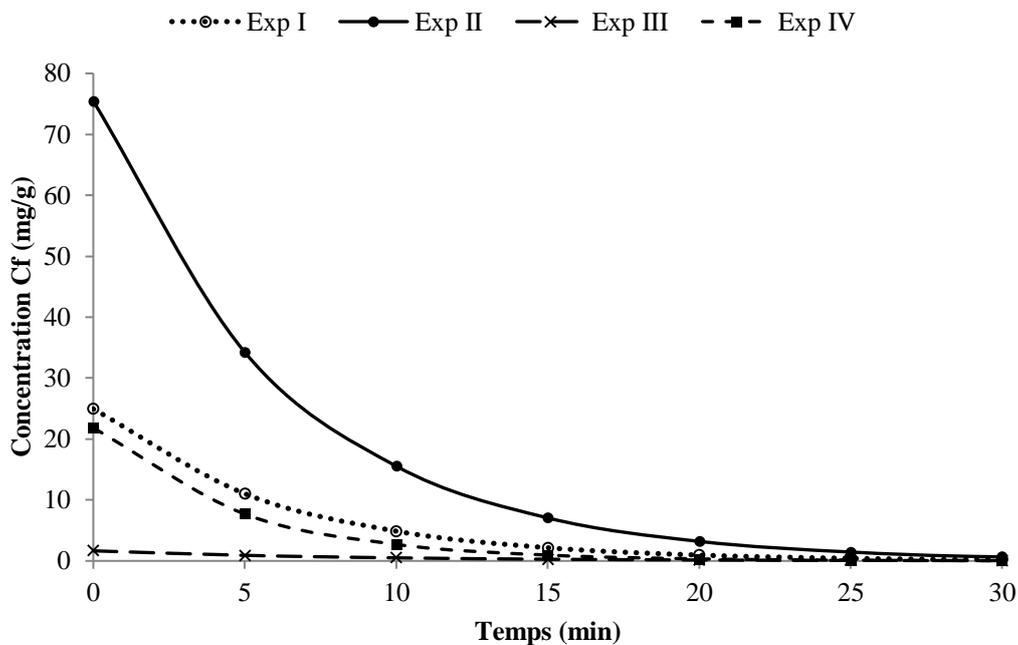


Figure 117 : Evolution de la concentration en phase vapeur de l'huile essentielle de romarin en fonction du temps sous différentes conditions opératoires

Les résultats des expériences de chaque plan factoriel sont donnés dans le tableau 65 :

Tableau 66 : Evolution de la concentration de l'huile essentielle en phase vapeur obtenue pour les essais programmés en fonction du temps

Temps (min)	5	10	15	20	25	30
Exp I	11,038	4,888	2,165	0,959	0,425	0,188
Exp II	34,264	15,559	7,065	3,208	1,457	0,661
Exp III	0,913	0,503	0,277	0,153	0,084	0,046
Exp IV	7,697	2,715	0,958	0,338	0,119	0,042

D'après ces résultats, nous avons pu calculer les coefficients du polynôme de 1^{er} degré à deux variables et les valeurs trouvées sont données dans le tableau 67 :

Tableau 67: Variation des effets des paramètres opératoires sur la concentration en fonction du temps

t (min)	5	10	15	20	25	30
a₀	13,478	5,916	2,616	1,164	0,521	0,234
a₁	7,503	3,221	1,395	0,609	0,267	0,117
a₂	-9,173	-4,307	-1,999	-0,919	-0,419	-0,190
a₁₂	-4,111	-2,115	-1,055	-0,516	-0,249	-0,119

L'expression du polynôme expérimental de chaque plan d'expérience en fonction du temps est la suivante :

$$Cf(t) = a_0(t) + a_1(t)X_1 + a_2(t)X_2 + a_1(t)a_2(t)X_1X_2 \quad (XVII)$$

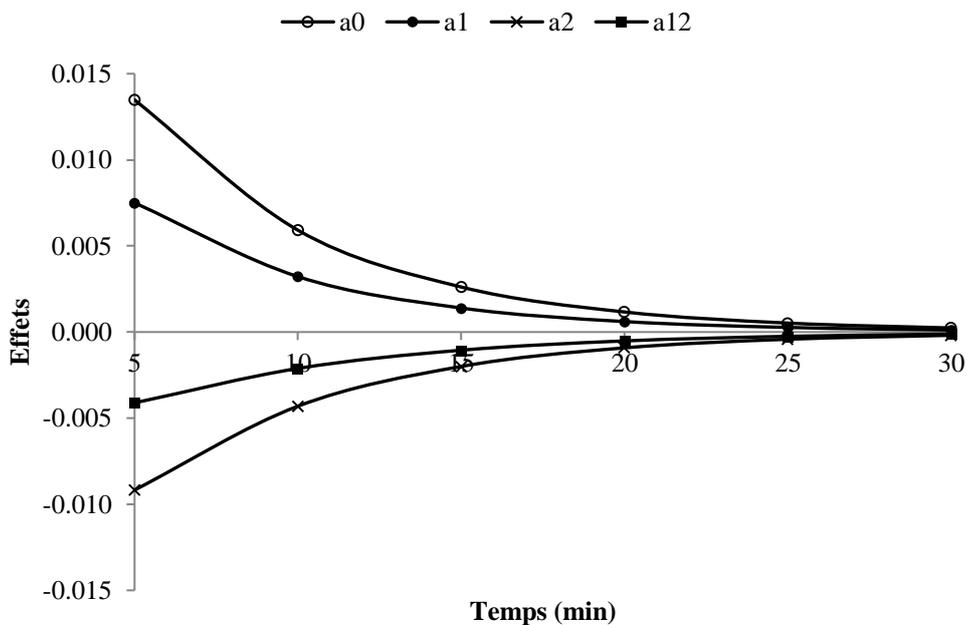


Figure 118: Variation des effets des paramètres opératoires et des effets conjugués sur la concentration en fonction du temps

La figure 118 montre que les effets des paramètres opératoires et leurs effets conjugués sont différents et varient au cours du temps :

- La masse a un effet positif sur la concentration. En effet, plus il y'a de matériel végétal plus la quantité d'huile extraite serait importante et donc la vapeur serait plus concentrée.
- Le débit de vapeur injectée a un effet négatif sur la concentration. Puisque la quantité d'huile extraite ne varie pas linéairement avec le débit, l'augmentation de ce dernier engendrera une dilution du distillat et donc la concentration en phase vapeur diminue. Les résultats montrent aussi que l'effet du débit est prédominant par rapport à l'effet de la masse.
- L'effet conjugué de la masse et du débit est négatif et leur augmentation réduit la concentration.
- Tous les effets diminuent vers la fin de l'extraction jusqu'à s'annuler, car à cet instant il ne reste plus d'huile essentielle emmagasinée dans le végétal et la concentration s'annule dans le cas de toutes les expériences.

En reprenant le plan factoriel 2^2 construit précédemment et en ajoutant une troisième variable qui est le temps d'extraction, nous avons pu construire un nouveau plan 2^3 s'intéressant à l'influence de la masse, du débit et du temps sur la concentration de l'huile essentielle en phase vapeur. Le domaine de variation du débit et de la masse est le même que dans le plan précédant. Le temps est varié de 5 à 30 minutes. Un nombre total de 8 expériences à été retenu.

Après avoir calculé les coefficients du polynôme expérimental nous aboutissons à l'expression suivante :

$$Y = 6,8562 + 3,81X_1 - 4,6817X_2 - 6,6217X_3 - 2,115X_1X_2 + 4,4915X_2X_3 - 3,6927X_1X_3 + 1,9956X_1X_2X_3$$

(XVIII)

En observant les valeurs des effets simples et conjugués, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Le temps est le paramètre prédominant par rapport aux autres et influe négativement sur la concentration. En effet plus la durée d'extraction augmente, moins il y aura de l'huile essentielle restante dans la matière végétale à extraire, il est donc favorable de minimiser la durée d'extraction.
- Le débit est le deuxième paramètre influençant la concentration négativement.
- La masse à un effet positif sur la concentration.
- Le débit et le temps ont un effet conjugué important sur la concentration, suivi de l'effet conjugué de la masse et du temps et enfin celui de la masse et du débit.
- L'effet conjugué de la masse, le débit est le temps n'est pas négligeable.
- La masse et le débit ont le même effet sur la concentration que sur le rendement.

3.4.2 *Pimpinella anisum* L. (Anis vert)

3.4.2.1 Plan factoriel 2² : Variation des effets sur la concentration au cours du temps

Bourenane (Bourenane, 2000) ont fait une étude cinétique de l'hydrodistillation par planification factorielle des expériences avec deux paramètres qui sont le broyage et le débit de vapeur. Les niveaux inférieurs et supérieurs attribués aux paramètres étudiés ainsi que les conditions opératoires de la planification de chaque expérience sont donné dans les tableaux 68 et 69.

Tableau 68 : Domaine d'étude
(Bourenane, 2000)

Paramètres	Niveau inférieur	Niveau Supérieur
Débit (ml/min)	1.037	2.666
Broyage	Non	Oui

Tableau 69 : Coordonnées réelles et centrées réduites du plan factoriel 2²
(Bourenane, 2000)

Expérience	Débit (ml/min)	Broyage	Paramètres réduites	
			X ₁	X ₂
1	1.037	Oui	-1	1
2	1.037	Non	-1	-1
3	2.666	Oui	1	1
4	2.666	Non	1	-1

Pour déterminer la variation des effets sur la concentration au cours du temps nous avons calculé l'expression de la concentration à partir des paramètres du modèle de 1^{er} ordre pour chaque expérience, les résultats sont montrés sur le tableau 70 :

Tableau 70 : Concentration de l'huile essentielle en phase vapeur obtenue pour les essais programmés par le plan factoriel 2² à chaque instant

Temps (min)	Concentration (mg/g)			
	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4
0	3,203	3,041	5,844	2,076
5	3,005	2,768	4,971	1,951
10	2,818	2,520	4,229	1,833
15	2,644	2,295	3,598	1,722
20	2,480	2,089	3,061	1,618
25	2,326	1,902	2,604	1,520
30	2,182	1,732	2,215	1,428
45	1,801	1,307	1,364	1,185
60	1,486	0,986	0,840	0,983
90	1,012	0,561	0,318	0,676
120	0,689	0,320	0,121	0,465
180	0,320	0,104	0,017	0,220

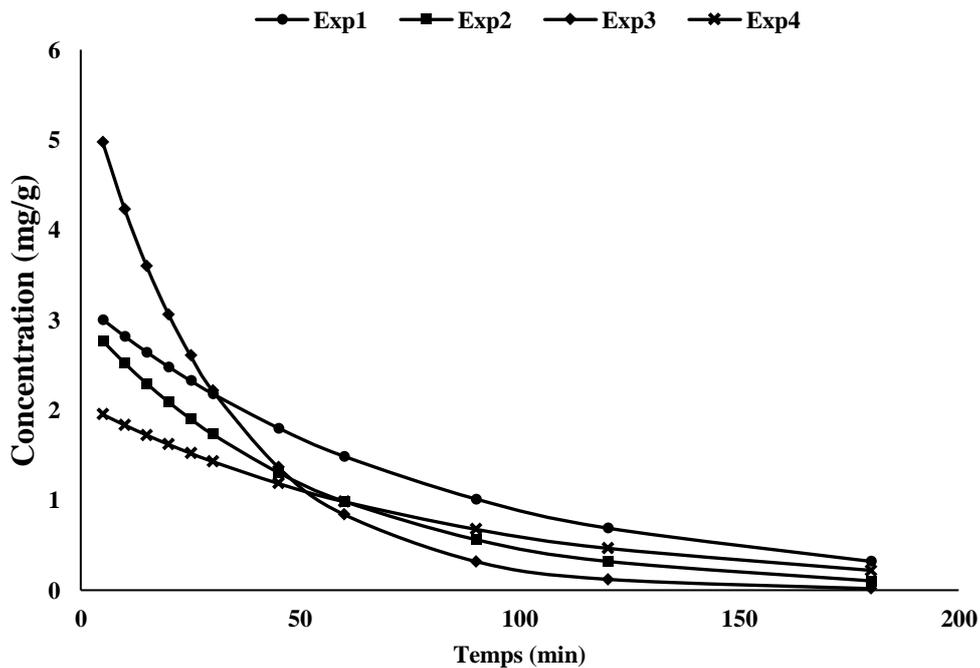


Figure 119 : Evolution de la concentration en fonction du temps pour chaque expérience.

Les courbes (Figure 119) présentent des allures comparables, mais des différences entre les concentrations sont à noter. Nous remarquons que les concentrations les plus élevées au début de l'extraction sont obtenues dans les expériences 3 et 1 qui sont relatives toutes les deux à des graines réduites en poudre, les résultats sont similaires à ceux déjà réalisés par la série d'essais menés par Bourenane qui ont montré l'effet positif de ce paramètre sur le rendement. Nous avons déterminé la variation des effets qui est représentée sur la figure 120.

Tableau 71 : Evolution des effets des paramètres opératoires sur la concentration en fonction du temps

Temps (min)	Concentration (mg/g)			
	a_0	a_1	a_2	a_{12}
5	0,814	-0,696	3,174	-0,287
10	0,674	-0,525	2,850	-0,181
15	0,556	-0,382	2,565	-0,095
20	0,458	-0,263	2,312	-0,028
25	0,377	-0,165	2,088	0,026
30	0,309	-0,084	1,889	0,067
45	0,168	0,077	1,414	0,140
60	0,089	0,161	1,074	0,162
90	0,023	0,202	0,642	0,145
120	0,006	0,178	0,399	0,106
180	0,003	0,105	0,165	0,047

a_0 : La valeur de la concentration au centre du domaine d'étude a_1 : Effet du débit

a_2 : Effet du broyage a_{12} : Effet conjugué

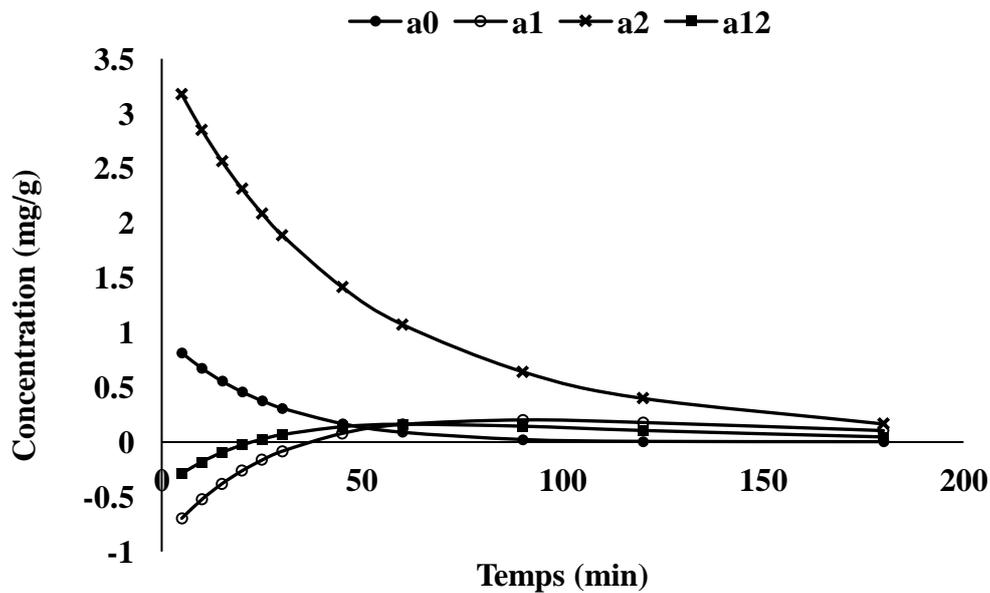


Figure 120 : Variation des effets individuels et conjugués sur la concentration en huile essentielle en fonction du temps

Le débit de vapeur d'eau possède un effet négatif sur la concentration en phase vapeur de l'huile essentielle durant les premières 30 minutes et positif sur le reste de l'hydrodistillation. Cet effet négatif du débit de vapeur d'eau pourrait être expliqué par le fait que quand une grande quantité de vapeur est produite la majeure partie de celle-ci passe au début directement en balayant la surface de la graine et donc une grande partie de la vapeur ne participe pas à l'extraction. Ensuite la vapeur pénètre dans les canaux sécréteurs et dès que les parois de ces canaux sont rompues, l'effet devient positif car plus la vapeur est produite plus l'effet est positif.

Alors que le broyage de la matière végétale a un effet positif sur la concentration et globalement décroissant durant les trois heures de l'hydrodistillation. En effet, puisque le broyage du substrat végétal augmente la surface d'échange donc la quantité d'huile extraite serait importante et donc la vapeur serait plus concentrée. Les résultats montrent aussi que l'effet du broyage est prédominant par rapport à l'effet du débit.

Quant à l'effet conjugué des deux paramètres, il présente des valeurs négatives que dans les 20 premières minutes de l'hydrodistillation mais son importance est moindre, comparé aux deux effets individuels.

Précédemment, nous savons que le débit et le broyage avaient une grande influence sur le rendement et la concentration de l'huile essentielle et pour connaître l'influence du temps d'extraction sur la concentration nous avons effectué une planification factorielle des expériences avec trois paramètres en ajoutant une troisième variable : le temps d'extraction au plan factoriel 2^2 déjà réalisés par Bourenane.

Le modèle mathématique du plan factoriel 2^3 obtenue est :

$$Y = 1.6201 + 0.1957X_1 + 0.3054X_2 - 1.2826X_3 + 0.4250X_1X_2 - 0.2378X_2X_3 - 0.3628X_1X_3 - 0.5422X_1X_2X_3$$

(XIX)

D'après ces résultats, la concentration optimale est obtenue dans la 5^{ème} expérience avec un débit de vapeur de 2.666 ml/min et en présence du broyage. Ce qui confirme encore une fois que le broyage influe positivement sur la concentration alors que le débit influe négativement.

Puisque Y représente la concentration de l'huile essentielle d'anis en phase vapeur, On cherche donc à maximiser cette réponse or c'est le temps d'extraction qui à l'effet le plus important et qui influe négativement sur la concentration suivie du broyage qui influe positivement sur la réponse, Alors que le débit de vapeur d'eau n'a relativement que peu d'effet comparé aux autres paramètres.

Quant aux effets conjugués nous pouvons observer que les trois paramètres : débit, broyage et le temps d'extraction au même temps ont un effet négatif important sur la concentration comparée aux autres effets conjugués de débit et broyage et celle de débit et temps d'extraction.

3.5 Conclusion

Nous avons retenu de ce chapitre que le modèle de 1^{er} ordre est compatible avec les cinétiques d'extraction étudiées. Cependant, l'application des modèles cinétiques considérant l'huile essentielle comme un pseudo-composé unique aux propriétés moyennes nous laisse s'interroger sur la validité de ses modèles dans le cas de changement de composition chimique ou de différence entre les constantes cinétiques des composés au cours de l'extraction. Le modèle de contribution de constituants tient compte de ces changements et permet de réaliser des simulations précises et détaillées.

Plusieurs facteurs peuvent influencer la concentration au cours de l'extraction des huiles essentielles. La planification factorielle des expériences permet d'optimiser ces paramètres pour avoir un meilleur rendement et donc une concentration plus élevée tout en consommant le moins de ressources possible.

Conclusion générale

A travers ce travail, nous avons essayé de lever le voile sur certains aspects liés aussi bien au procédé d'extraction des huiles essentielles qu'à la modélisation de celui-ci. Ceci nous a permis ainsi de tirer quelques conclusions concernant ce sujet.

L'exploitation des résultats de certains travaux antérieurs nous a permis de déterminer les conditions à mettre en œuvre pour maximiser le rendement de l'extraction. En premier lieu, il est favorable de faire la récolte en période de floraison, et de garantir un stockage à l'air libre et en plain lumière pendant 2 semaines au minimum. En ce qui concerne la matière végétale, il est conseillé d'utiliser les feuilles sèches du pistachier et du romarin, les fruits de l'anis et les parties aériennes de la menthe verte. Enfin, le choix d'un débit de distillat optimal et d'une masse de végétal élevée, avec une durée de traitement de 1h 30 min pour l'entraînement à la vapeur et 3 h pour l'hydrodistillation est préférable.

L'étude de la cinétique d'extraction de l'HE a montré que celle-ci se fait en deux étapes : La première est rapide et se fait à vitesse constante. Elle correspond à l'extraction de l'huile localisée dans les sites superficiels et pendant laquelle la plus grande partie de l'huile est récupéré. La deuxième étape est lente et se fait à vitesse variable décroissante. Elle correspond à l'extraction de l'huile emmagasinée dans les sites internes.

Les constituants de l'HE sont récupérés dans l'ordre croissant de leur température d'ébullition dans le cas de l'entraînement à la vapeur d'eau. Cependant, dans l'hydrodistillation, il est suggéré que l'ordre de sortie des constituants est dicté par leur polarité et non par leur volatilité.

La qualité de l'HE est jugée par sa composition chimique est ses propriétés physico-chimiques. Pour obtenir une huile de romarin plus riche en eucalyptol (1,8-Cinéole) il est favorable de choisir une durée de traitement plus courte (10 minutes). Si l'on s'intéresse à la récupération d'une huile de menthe verte riche en carvone et en 1,8-cinéole, il serait plus rentable de faire un traitement d'une courte durée (30 minutes). Cependant, des durées de traitement plus longues permettraient d'avoir un bon rendement en trans-carvone et en Germacrène-D.

La modélisation de l'évolution de la concentration en phase vapeur pendant l'extraction a montré que celle-ci est influencée par les mêmes facteurs que le rendement et que la concentration est toujours maximale en début de l'extraction et ne s'annule qu'à la fin du processus. Nous retenons aussi que la quantité de vapeur injectée influe énormément sur la concentration, l'augmentation du débit de vapeur provoque la diminution de la concentration.

Le modèle cinétique de premier ordre proposé par Koul (Koul et al., 2004) est un modèle compatible avec la plupart des cinétiques d'extraction des huiles essentielles dont celles des

espèces étudiées. Cependant, si nous considérons l'huile essentielle en tant que pseudo-composant unique aux propriétés moyennes, cela veut dire que nous négligeons tout changement de composition de l'huile qui peut arriver au cours de l'extraction ou toute variation des constantes cinétiques des composés. Dans le cas où ces changements sont significatifs, le modèle de contribution de constituants est plus adapté et permet de prendre compte des différentes cinétiques des composés de l'huile.

La modélisation appliquée au domaine de l'extraction des huiles essentielles a pour avantage d'accéder à des données utiles pour la compréhension, la prédiction, et l'optimisation de ce type de procédés pour de futures applications.

Références bibliographiques

- AĆIMOVIĆ, M.G., TEŠEVIĆ, V., TODOSIJEVIĆ, M., DJISALOV, J. et OLJACA, S.** Compositional characteristics of the essential oil of *Pimpinella anisum* and *Foeniculum vulgare* grown in Serbia. *Botanica Serbica*. 2014. Vol. 39, no. 1, p. 9-14.
- ADDADI, H. et FERRADJI, S.M.** *Extraction d'huile essentielle d'une plante médicinale « La Menthe »*. Mémoire de Licence : Chimie organique. Saida: Université Dr. Moulay Tahar. 2014.
- AFNOR.** Huile essentielle d'anis vert. In: *Les huiles essentielles*. AFNOR. 1976.
- AFNOR.** *Norme française huile essentielle de romarin (Rosmarinus Officinalis L.)*. Paris: AFNOR. 1987.
- AFNOR.** *Norme française huile essentielle de romarin (Rosmarinus Officinalis L.)*. Paris: AFNOR. 1994.
- AFNOR.** *Matières premières aromatiques d'origine naturelle - Vocabulaire*. ISO 9235. 1998.
- AFNOR.** *Recueil de normes "Les huiles essentielles". Tome 2. Monographies relatives aux huiles essentielles*. Paris-La Défense: Association française de normalisation. 2000. 661-663 p. ISBN 978-2-12-177561-6.
- AFNOR.** *Huiles essentielles*. Paris-La Défense: Association française de normalisation. 2011. ISBN 978-2-12-177581-4.
- AIT AMER MEZIANE, I.** *Modélisation du transfert de matière et de la consommation énergétique dans les procédés d'extraction*. Thèse de Doctorat: Génie chimique. Option : énergie et développement durable. Alger: Ecole Nationale Polytechnique. 2020.
- AIT-OUAHIOUNE, C.H.** *Contribution à l'étude de l'effet du substrat sur la composition quantitative et qualitative de l'huile essentielle de Mentha viridis L (menthe verte)*. Thèse d'ingénieur: Agronomie. Tizi-Ouzou: Université de Mouloud Mammeri. 2005.
- ALBU, S.M.A., AL SAIDI, H., AMARESH, N. et MULLAICHARAM, B.** Study of Physicochemical Properties, Antibacterial and GC-MS Analysis of Essential Oil of the Aniseed (*Pimpinella anisum* Linn.) in Oman. *Research & Reviews: Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 2014. Vol. 11, p. 13.
- AL-HILPHY, A.R.S., AL-FEKAIKI, D.F. et HUSSEIN, R.A.** Extraction of Essential Oils from Some Types of Umbelifera Family using Microwave-Assisted Water Distillation. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*. 2015. Vol. 5, no. 22, p. 16.
- AL-MALAHMEH, A., AL-AJLOUNI, A., WESSELING, S., SOFFERS, A., AL-SUBEIHI, A., KIWAMOTO, R., VERVOORT, J.J.M. et RIETJENS, I.** Physiologically

based kinetic modeling of the bioactivation of myristicin. *Archives of toxicology*. 2017. Vol. 91, p. 713-734. DOI 10.1007/s00204-016-1752-5.

AL-MAOFARI, A., EL-HAJJAJI, S., DEBBAB, A., ZAYDOUN, S., OUAKI, B., CHAROF, R., MENNANE, Z., HAKIKI, A. et MOSADDAK, M. Chemical composition and antibacterial properties of essential oils of *Pimpinella anisum* L. growing in Morocco and Yemen. *Scientific Study & Research : Chemistry & Chemical Engineering, Biotechnology, Food industry*. 2013. Vol. 14, no. 1, p. 11-16.

AL-SEREITI, M.R., ABU-AMER, K.M. et SEN, P. Pharmacology of rosemary (*Rosmarinus officinalis* Linn.) and its therapeutic potentials. *Indian Journal of Experimental Biology*. 1999. Vol. 37, no. 2, p. 124-130.

AL-WENDAWI, S., GHARB, L.A. et GHRERY, R.S.A. Antioxidant, antibacterial and antibiofilm potentials of anise (*Pimpinella anisum*) seeds extracted essential oils. *Iraqi Journal of Agricultural Sciences*. 2021. Vol. 52, no. 2, p. 348-358. DOI 10.36103/ijas.v52i2.1296.

AMARA, N., BENRIMA, A., ANBA, C. et BELKHIR, H. Activité antimicrobienne de l'huile essentielle des fruits du Pistachier Lentique (*Pistacia Lentiscus* L.). *Agrobiologia*. 2019. Vol. 9, p. 1669-1676.

AMHAMDI, H., AOUINTI, F., WATHELET, J.P. et ELBACHIRI, A. Chemical Composition of the Essential Oil of *Pistacia lentiscus* L. from Eastern Morocco. *Rec. Nat. Prod.* 2009. Vol. 3, no. 6, p. 90-95.

ANGIONI, A., BARRA, A., CERETI, E., BARILE, D., COÏSSON, J.D., ARLORIO, M., DESSI, S., CORONEO, V. et CABRAS, P. Chemical composition, plant genetic differences, antimicrobial and antifungal activity investigation of the essential oil of *Rosmarinus officinalis* L. *J. Agricultural Food Chem.* 2004. Vol. 52, no. 11, p. 3530-3535. DOI 10.1021/jf049913t.

AOUINTI, F., IMELOUANE, B., TAHRI, M., WATHELET, J.P., AMHAMDI, H. et ELBACHIRI, A. New study of the essential oil, mineral composition and antibacterial activity of *Pistacia lentiscus* L. from Eastern Morocco. *Research on Chemical Intermediates*. 2014. Vol. 40, no. 8, p. 2873-2886. DOI 10.1007/s11164-013-1134-z.

AOUINTI, F., ZIDANE, H., TAHRI, M., WATHELET, J.P. et BACHIRI, A.E. Chemical composition, mineral contents and antioxidant activity of fruits of *Pistacia lentiscus* L. from Eastern Morocco. *J. Mater. Environ.* 2013. Vol. 5, p. 199-206.

ARAB, K., BOUCHENAK, O. et YAHIAOUI, K. Phytochemical Study and Evaluation of the Antimicrobial and Antioxidant Activity of Essential Oils and Phenolic Compounds of *Pistacia Lentiscus* L. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*. 2014. Vol. 6, no. 1, p. 77. DOI 10.4314/jfas.v6i1.7.

ARABI, A., DJIBAOU, R., MALIHAC, C., SISBANE, I., LATTAB, A., BECHELAGHEM, N., DAHAH, H., REZIGA, C., ETTALHI, M., TALEB, F., OUAR KORICH, M. et DAHLOUM, L. Chemical composition and antibacterial activity of essential oil from leaves and twigs of *Pistacia lentiscus* growing in Mostaganem Province (Algeria). *International Journal of Biosciences (IJB)*. 2017. Vol. 10, no. 05, p. 146-158. DOI 10.12692/ijb/10.5.146-158.

ARSLAN, N., GÜRBÜZ, B., SARIHAN, E.O., BAYRAK, A. et GÜMÜŞÇÜ, A. Variation in Essential Oil Content and Composition in Turkish Anise (*Pimpinella anisum* L.) Populations. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 2004. Vol. 28, no. 3, p. 173-177.

AYE KEE, L., BAKR SHORI, A. et BABA, A.S. Bioactivity and health effects of *Mentha spicata*. *Integrative Food, Nutrition and Metabolism*. 2017. Vol. 5, no. 1, p. 1-2. DOI 10.15761/IFNM.1000203.

BABA-AISSA, F. *Plantes médicinales en Algérie*. 1991.

BACHROUCH, O., MSAADA, K., WANNES, W.A., TALOU, T., KSOURI, R., SALEM, N., ABDERRABA, M. et MARZOUK, B. Variations in composition and antioxidant activity of Tunisian *Pistacia lentiscus* L. leaf essential oil. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*. 2013. Vol. 149, no. 1, p. 38-47. DOI 10.1080/11263504.2013.809027.

BALAN, K.V., DEMETZOS, C., PRINCE, J., DIMAS, K., CLADARAS, M., HAN Z., WYCHE J H., et PANTAZIS P. Induction of apoptosis in human colon cancer HCT116 cells treated with an extract of the plant product. In: *Chios mastic gum. In Vivo*. 2005.

BALI, N. et BELBLIDIA, N. *Intensification des procédés et modélisation de la consommation énergétique*. Projet de Fin d'Etude : Génie chimique. Alger: Ecole Nationale Polytechnique. 2015. 128 p.

BARAZANI, O., DUDAI, N. et GOLAN-GOLDHIRSH, A. Comparison of mediterranean *Pistacia lentiscus*. *Journal of Chemical Ecology*. 2003. Vol. 29, no. 8, p. 14.

BARDAWEEL, S.K., BAKCHICHE, B., ALSALAMAT, H.A., REZZOUG, M., GHERIB, A. et FLAMINI, G. Chemical composition, antioxidant, antimicrobial and Antiproliferative activities of essential oil of *Mentha spicata* L. (Lamiaceae) from Algerian Saharan atlas. *BMC Complementary and Alternative Medicine*. 2018. Vol. 18, no. 1, p. 201. DOI 10.1186/s12906-018-2274-x.

BARRANCO, R. *8th International Congress of Essential Oils*. 1980.

BAZZONI, E., MORETTI, M.D.L., SANNA PASSINO, G. et PROTA, R. Antifeedant effects of some essential oils on *Ceratitis capitata* Wied. (Diptera, Tephritidae). *Journal of Essential Oil Research*. 1998. Vol. 10, no. 4, p. 405-412. DOI 10.1080/10412905.1998.9700930.

BEGUM, A., SANDHYA, S., ALI, S.S., VINOD, K.R., REDDY, S. et BANJI, D. An in-depth review of the medicinal flora *Rosmarinus officinalis* (Lamiaceae). *Acta Scientiarum Polonorum*. 2013. Vol. 12, no. 1, p. 61-73.

BEKKARA, F.A., BOUSMAHA, L., BENDIAB, S.A.T., BOTI, J.B. et CASANOVA, J. Composition chimique de l'huile essentielle de *Rosmarinus officinalis* L poussant à l'état spontané et cultivé de la région de Tlemcen. *Biologie & Santé*. 2007. Vol. 7, no. 1, p. 6-11.

BELOUED, A. *Plantes médicinales d'Algérie*. Ben Aknoun, Alger: OPU. 2001. 277 p.

BENAZZOUZ, A. et HAMDANE, A. *Etude et analyse des plantes médicinales Algérienne : Mentha pulegium, Mentha rotundifolia et Mentha spicata L.* Mémoire de Master: Chimie pharmaceutique. Tizi-Ouzou: Université de Mouloud Mammeri. 2012.

BENYOUSSEF, E.-H., AIT AMER MEZIANE, I., BALI, N., BELBLIDIA, N.-B. et ABATZOGLOU, N. The first-order model in the simulation of essential oil extraction kinetics. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*. 2019. Vol. 15, p. 100226. DOI 10.1016/j.jarmap.2019.100226.

BENYOUSSEF, E.-H., CHARCHARI, S., NACER-BEY, N., YAHIAOUI, N., CHAKOU, A. et BELLATRECHE, M. The Essential Oil of *Pistacia lentiscus* L. from Algeria. *Journal of Essential Oil Research*. 2005. Vol. 17, no. 6, p. 642-644. DOI 10.1080/10412905.2005.9699021.

BENYOUSSEF, E.-H. et SAIBI, S. Influence of essential oil composition on water distillation kinetics: Essential oil composition and kinetics modelling. *Flavour and Fragrance Journal*. 2013. Vol. 28, no. 5, p. 300-308. DOI 10.1002/ffj.3169.

BENYOUSSEF, E.-H., YAHIAOUI, N., KHELFAOUI, A. et AID, F. Water distillation kinetic study of spearmint essential oil and of its major components. *Flavour and Fragrance Journal*. 2005. Vol. 20, no. 1, p. 30-33. DOI 10.1002/ffj.1406.

BENYOUSSEF, E.-H., YAHIAOUI, N., NACER-BEY, N.-B., KHELFAOUI, A. et BELHADJ, M. Essential Oil of *Mentha Spicata* L. from Algeria. *Rivista Italiana EPPOS*. 2004. No. 37, p. 31-35.

BETTAIEB, Rebey.I., BOURGOU, S., AIDI, Wannes.W., HAMROUNI, Selami.I., SAIDANI TOUNSI, M., MARZOUK, B., FAUCONNIER, M.-L. et KSOURI, R. Comparative assessment of phytochemical profiles and antioxidant properties of Tunisian and Egyptian anise (*Pimpinella anisum* L.) seeds. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*. 2017. Vol. 152, no. 5, p. 971-978. DOI 10.1080/11263504.2017.1403394.

BINZET, G., BINZET, R. et ARSLAN, H. The essential oil compositions of *Rosmarinus officinalis* L. leaves growing in Mersin, Turkey. *European Journal of Chemistry*. 2020.

Vol. 11, no. 4, p. 370-376. DOI 10.5155/eurjchem.11.4.370-376.2048.

BORGES, R.S., ORTIZ, B.L.S., PEREIRA, A.C.M., KEITA, H. et CARVALHO, J.C.T. Rosmarinus officinalis essential oil: A review of its phytochemistry, anti-inflammatory activity, and mechanisms of action involved. *Journal of Ethnopharmacology*. 2019. Vol. 229, no. 10, p. 29-45. DOI 10.1016/j.jep.2018.09.038.

BOUAINE, A. *Etude de l'activité antifongique des huiles essentielles extraites des deux plantes aromatiques et médicinales: Lentisque et Myrte* [en ligne]. Master sciences et techniques: Chimie des molécules Bio Actives. Maroc: Université Sidi Mohammed Ben Abdellah. 2017. [Consulté le 5 mai 2021]. Consulté à l'adresse: <https://docplayer.fr/67651675-Etude-de-l-activite-antifongique-des-huiles-essentielles-extraites-des-deux-plantes-aromatiques-et-medicinales-lentisque-et-myrte.html>

BOUKHEBTI, H., CHAKER, A.N., BELHADJ, H., SAHLI, F., LAOUER, H. et HARZALLAH, D. Chemical composition and antibacterial activity of *Mentha pulegium* L. and *Mentha spicata* L. essential oils. *Der Pharmacia Lettre*. 2011. Vol. 3, no. 4, p. 267-275.

BOULEZAZEN, A.E. *Evaluation de l'activité antioxydante et antimicrobienne d'une plante aromatique (Rosmarinus Officinalis L.) de la forêt Béni Melloul –Khenchela*. Mémoire de fin d'étude: Sciences biologiques. El-Oued: Université El Chahid Hamma Lakhder. 2017.

BOUMAHDY, Y., MOGHRANI, H., NASRALLAH, N., OUAREK, S. et MAACHI, R. Microwave-assisted hydrodistillation of the essential oil from Algerian *Pimpinella anisum* seeds. *Flavour and Fragrance Journal*. 2020. Vol. 36. DOI 10.1002/ffj.3614.

BOURENANE, K. *Extraction d'une huile essentielle d'anis vert*. Projet de Fin d'Etude: Génie chimique. Alger: Ecole Nationale Polytechnique. 2000.

BOUTABIA, L., TELAILIA, S., BOUGUETOF, I., GUENADIL, F. et CHEFROUR, A. Composition chimique et activité antibactérienne des huiles essentielles de *Rosmarinus officinalis* L. de la région de Hammamet (Tébessa-Algérie). *Bulletin de la Societe Royale des Sciences de Liege*. 2016. Vol. 85, p. 174-189.

BOUTEKEDJIRET, C. *Etude des procédés d'extraction appliqués à la récupération des essences de romarin. Transfert de matière et modélisation*. Thèse de Doctorat d'État: Génie chimique. Alger: Ecole Nationale Polytechnique. 1999.

BOUTEKEDJIRET, C., BENTAHAR, F., BELABBES, R. et BESSIERE, J.M. Extraction of rosemary essential oil by steam distillation and hydrodistillation. *Flavour and Fragrance Journal*. 2003. Vol. 18, no. 6, p. 481-484. DOI 10.1002/ffj.1226.

BRADESI, P. *Apport de la RMN du carbone-13 à l'analyse des mélanges naturels dans le domaine de l'agroalimentaire: Huiles essentielles et autres productions végétales*. Thèse de Doctorat: Chimie organique et analytique. Corse: Université de Corse. 1995.

BRAHMI, F., ADJAOUD, A., MARONGIU, B., FALCONIERI, D., YALAOU-

- GUELLAL, D., MADANI, K. et CHIBANE, M.** Chemical and biological profiles of essential oils from *Mentha spicata* L. leaf from Bejaia in Algeria. *Journal of Essential Oil Research*. 2016. Vol. 28, no. 3, p. 211-220. DOI 10.1080/10412905.2015.1118411.
- BRUNETON, J.** Huiles essentielles. In: *Pharmacologie: phytochimie, plantes médicinales*, 2^e éd. Paris: Lavoisier. 1993. p. 406-466.
- CAMEL, V.** Recent extraction techniques for solid matrices-supercritical fluid extraction, pressurized fluid extraction and microwave-assisted extraction: their potential and pitfalls. *Analyst*. 2001. Vol. 126, no. 7, p. 1182.
- CECCHINIE, T.D.** *Encyclopédie des plantes médicinales*. 1976.
- CHAIB, M.Y. et BENELHADJ SAID, A.** *Etude de l'évolution de la concentration en phase vapeur dans les procédés d'extraction des huiles essentielles*. Projet de Fin d'Etude : Génie chimique. Alger: Ecole Nationale Polytechnique. 2020. 101 p.
- CHAUMETON, H.** *Les plantes aromatiques*. Solar. 1981.
- CHEMAT, F., LUCCHESI, M. et SMADJA, J.** Solvent-free microwave extraction of volatile natural compounds [en ligne]. EP1439218B1. 2004. Union Européenne. [Consulté le 22 avril 2021]. Consulté à l'adresse: <https://patents.google.com/patent/EP1439218B1/en>
- CHEMAT, F. et LUCCHESI, M.E.** Extractions assistées par micro-ondes des huiles essentielles et des extraits aromatiques. *Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie*. 2005. Vol. 20, p. 77-99.
- CHEMAT, F., VIAN, M. et VISINONI, F.** Microwave hydrodiffusion for isolation of natural products [en ligne]. EP1955749A1. 2008. Union Européenne. [Consulté le 23 avril 2021]. Consulté à l'adresse: <https://patentimages.storage.googleapis.com/83/2c/bb/a316acce5cccbb/EP1955749A1.pdf> 07100935.1
- CHIEJ, R.** *Les plantes médicinales*. Solar (guide vert). 1982.
- COMBAZ, J.** *La pharmacopée*. Thèse de doctorat: Pharmacie. Grenoble: Université scientifique et médicale de Grenoble. 1985. 164 p.
- CORTICCHIATO, M. et CASANOVA, J.** Analyse des mélanges complexes par RMN du carbone-13 : Application aux huiles essentielles. *Analisis*. 1992. Vol. 20, no. 1, p. 51-58.
- COSTE, H.** *Flore descriptive et illustrée de la France de la Corse et des contrées limitrophes, Second Tirage*. Librairie des Sciences et des Arts. Paris. 1937.
- COUIC-MARINIER, F.** *Huiles essentielles : l'essentiel*. Conseils pratiques en aromathérapie pour toute la famille au quotidien. Imprimerie Moderngraphic. 2013. 179 p. ISBN 2-9531630-1-8.
- CRAVEIRO, A.A., MATOS, F.J.A., ALENCAR, J.W. et PLUMEL, M.M.** Microwave

oven extraction of an essential oil. *Flavour and Fragrance Journal*. 1989. Vol. 4, no. 1, p. 43-44. DOI <https://doi.org/10.1002/ffj.2730040110>.

CRETI, L. *Les plantes aromatiques et médicinales. Comment les reconnaître et l'utiliser.* Atlas. 1981.

CRUND, E. *Atlas des plantes médicinales.* Corbetta (Francesse). 1983.

DAMJANIC, A. et **GRZUNOV, K.** Ispitivanje sastava i količine dekantiranog i ekstrahiranog ružmarinova ulja iz vodenog destilata (Investigation of the composition and contents of decanted and extracted rosemary oil). *Arhiv za Farmaciju (Beograd)*. 1976. Vol. 26, p. 1-6.

DE SILVA, T. *A manual on the essential oil industry.* United Nations Industrial Development Organisation. Vienna, Austria. 1995. 232 p.

DEDOUSSIS, G.V.Z., KALIORA, A.C., PSARRAS, S., CHIOU, A., MYLONA, A., PAPAPOPOULOS, N.G. et **ANDRIKOPOULOS, N.K.** Antiatherogenic effect of Pistacia lentiscus via GSH restoration and downregulation of CD36 mRNA expression. *Atherosclerosis*. 2004. Vol. 174, no. 2, p. 293-303. DOI 10.1016/j.atherosclerosis.2004.02.011.

DELITALA, L. et **SOCCOLINI, F.** Study of Rosmarinus officinalis in Sardinia. *Rivista Italiana EPPOS*. 1980. Vol. 62, p. 195-201.

DERWICH, E., MANAR, A., BENZIANE, Z. et **BOUKIR, A.** GC/MS Analysis and In vitro Antibacterial Activity of the Essential Oil Isolated from Leaf of Pistacia lentiscus Growing in Morocco. *World Applied Sciences Journal*. 2010. Vol. 8, p. 11.

DESCHEPPER, R. *Variabilité de la composition des huiles essentielles et intérêt de la notion de chémotype en aromathérapie.* Thèse de Doctorat. Université d'Aix-Marseille. 2017. 172 p.

DESTANDAU, E., MICHEL, T. et **ELFAKIR, C.** CHAPTER 4. Microwave-assisted Extraction. In: ROSTAGNO, M.A. et PRADO, J.M. (éd.), *RSC Green Chemistry* [en ligne]. Cambridge: Royal Society of Chemistry. 2013. p. 113-156. Green Chemistry Series. [Consulté le 24 avril 2021]. ISBN 978-1-84973-606-0. Consulté à l'adresse: <http://ebook.rsc.org/?DOI=10.1039/9781849737579-00113>

DOB, T., DAHMANE, D. et **CHELGHOU, C.** Chemical Composition of the Essential Oils of Pistacia lentiscus L. from Algeria. *Journal of Essential Oil Research*. 2011. Vol. 18, no. 3, p. 335-338. DOI 10.1080/10412905.2006.9699105.

DOUAY, S. *Monographie de la menthe verte.* France: Université de Lille. 2008.

DRAGOCO. *Rapport.* 1979.

DUGEA, P. et **GIRAULT, M.** *Analyse de la variance et plan d'expérience.* Willy

interscience.

1972.

DUPONT, F. et **GUIGNARD, J.L.** *Botanique : Les familles de plantes*. Elsevier. Masson, Issy-les-Moulineaux. 2012. 336 p.

EL-ROKIEK, K.G., IBRAHIM, M.E., EL-DIN, S.A.S. et **EL-SAWI, S.A.** Using Anise (*Pimpinella anisum* L.) Essential Oils As Natural Herbicide. *Journal of Materials and Environmental Science*. 2020. Vol. 11, p. 10.

FARHAT, A. *Vapo-diffusion assistée par micro-ondes: conception, optimisation et application* [en ligne]. Thèse de Doctorat : Sciences des Procédés, Sciences des Aliments. Avignon: Université d'Avignon. 2010. 137 p. [Consulté le 11 avril 2021]. Consulté à l'adresse: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00547809>

FARHAT, A., GINIES, C., ROMDHANE, M. et **CHEMAT, F.** Eco-friendly and cleaner process for isolation of essential oil using microwave energy: Experimental and theoretical study. *Journal of Chromatography A*. 2009. Vol. 1216, no. 26, p. 5077-5085. DOI 10.1016/j.chroma.2009.04.084.

FAUCON, M. *Traité d'aromathérapie scientifique et médicale : fondements & aide à la prescription : monographies : huiles essentielles, huiles végétales, hydrolats aromatiques*. Sang de la Terre et Médical. Paris. 2012. 879 p.

FERNÁNDEZ, A., CAMACHO, A., FERNÁNDEZ, C., ALTAREJOS, J. et **PÉREZ, P.** Composition of the Essential Oils from Galls and Aerial Parts of *Pistacia lentiscus* L. *Journal of Essential Oil Research*. 2000. Vol. 12, no. 1, p. 19-23. DOI 10.1080/10412905.2000.9712031.

FIGOLI, A., DONATO, L., CARNEVALE, R., TUNDIS, R., STATTI, G.A., MENICHINI, F. et **DRIOLI, E.** Bergamot essential oil extraction by pervaporation. *Desalination*. 2006. Vol. 193, no. 1, p. 160-165. DOI 10.1016/j.desal.2005.06.060.

FORMACEK, V. et **KUBECZKA, K.H.** ¹³C-NMR Analysis of Essential Oils. In: *Aromatic plants : Basic and Applied Aspects*. 1982. p. 177-181. ISBN 978-94-009-7644-3.

FRANCHOMME, P., JOLLOIS, R. et **PENOËL, D.** L'Aromathérapie exactement. In: *Encyclopédie de l'utilisation thérapeutique des extraits aromatiques*. Roger Jollois. 2001.

GANZLER, K., SALGÓ, A. et **VALKÓ, K.** Microwave extraction. A novel sample preparation method for chromatography. *Journal of Chromatography*. 1986. Vol. 371, p. 299-306. DOI 10.1016/s0021-9673(01)94714-4.

GAVAHIAN, M., FARAHNAKY, A., JAVIDNIA, K. et **MAJZOABI, M.** Comparison of ohmic-assisted hydrodistillation with traditional hydrodistillation for the extraction of essential oils from *Thymus vulgaris* L. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2012. Vol. 14, p. 85-91. DOI 10.1016/j.ifset.2012.01.002.

- GENEVIÈVE, F.** *Plantes aromatiques et condimentaires.* ARTHAUD. 1990.
- GHOUATI, Y., BELAICHE, T., OUHSSINE, M., AMECHROUQ, A., TAHIRI, A. et CHAKIR, S.** Composition chimique et activité antibactérienne de l'huile essentielle de fruits d'anis vert Marocain. *Bull. Soc. Pharm. Bordeaux.* 2012. Vol. 151, p. 10.
- GOEB, P.** *Aromathérapie pratique et familiale.* MDB. 1999. ISBN 2-913664-02-4.
- GONÇALVES, R.S., BATTISTIN, A., PAULETTI, G., ROTA, L. et SERAFINI, L.A.** Antioxidant properties of essential oils from *Mentha* species evidenced by electrochemical methods. *Revista Brasileira de Plantas Mediciniais.* 2009. Vol. 11, no. 4, p. 372-382. DOI 10.1590/S1516-05722009000400004.
- GOUPY, J.** Plans d'expériences. *Techniques de l'Ingénieur.* 1992.
- GRANGER, M.M.R., PASSET, J. et ARBOUSSET, G.** L'essence de *Rosmarinus officinalis*, influence du mode de traitement du matériel végétal. *Parf. Cosmet. Sav.* 1973. Vol. 3, no. 3, p. 133-137.
- GREEN, J.J., BADDELEY, J., CORTINA, J. et WATSON, C.** Root development in the Mediterranean shrub *Pistacia lentiscus* as affected by nursery treatments. *Journal of Arid Environments.* 2005. Vol. 61, p. 1-12. DOI 10.1016/j.jaridenv.2004.09.001.
- GROSJEAN, F.** *Etude botanique, physicochimique et pharmacologique de Mentha pulegium L. et Mentha viridis L. var Nahnah; comparaison de l'activité antifongique des huiles essentielles.* Thèse de Doctorat. Besançon: Université de Besançon. 1990. 165 p.
- GRZUNOV, K. et DEVETAK, Z.** Gas chromatography of rosemary oil isolated by various methods of distillation from rosemary leaves. *Kemija u Industriji.* 1978. Vol. 27, p. 409.
- HADJ-AHMED, S. et KOUIDER-MAHMOUD, N.** *Etude de l'extraction et de l'activité des huiles essentielles de menthe dans la région d'Ain defla.* Mémoire de Master. Khemis-Milana: Université de Khemis-Milana. 2017. 115 p.
- HAFSE, M., FIKRI, B.K. et ABDELLAH, F.** Volatile Components and Antibacterial Profile of Essential Oils Extracted from Leaves and Twigs of *Pistacia lentiscus* L. *British Microbiology Research Journal.* 2013. Vol. 3, no. 4, p. 602-611. DOI 10.9734/BMRJ/2013/5376.
- HALOUI, T., FARAH, A., BALOUIRI, M., CHRAIBI, M., FADIL, M., BENBRAHIM, K. et ALAOUI, A.** Bacteriostatic and Bactericidal Profile of Leaves and Twigs Essential oils of Moroccan *Pistacia lentiscus* L. *Journal of Applied Pharmaceutical Science.* 2015. P. 050-053. DOI 10.7324/JAPS.2015.50607.
- HALOUI, T., FARAH, A., LEBRAZI, S., FADIL, M. et BELRHITI, A.** Effect of harvesting period and drying time on the essential oil yield of *Pistacia lentiscus* L. leaves. *Der Pharma Chemica.* 2015. Vol. 7, p. 320-324.

HAMIANI, A., KAMBOUCHE, N. et BELLAHOUEL, S. Chemical Composition and Antioxidant Potential of Pistacia lentiscus L. Essential Oil from Oran (Algeria). *Advances in Bioscience and Biotechnology*. 2016. Vol. 07, no. 12, p. 539-544. DOI 10.4236/abb.2016.712048.

HANNOUR, K., BOUGHDAD, A., MAATAOUI, A. et BOUCHELTA, A. Chemical composition of Rosmarinus officinalis (Lamiaceae) essential oils and evaluation of their toxicity against Bruchus rufimanus (Coleoptera: Chrysomelidae: Bruchinae) in Morocco. *International Journal of Tropical Insect Science*. 2018. Vol. 38, no. 3, p. 192-204. DOI 10.1017/S1742758418000012.

HASSAN, O.M. et ELHASSAN, I.A. Characterization of essential oils from fruits of Umbelliferous crop cultivated in Sudan I. Pimpinella anisum L (Anise) and Anethum graveolens L. (Dill). *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 2016. Vol. 6, no. 1, p. 109-112.

HATEGEKIMANA, A. et ERLER, F. Fecundity and fertility inhibition effects of some plant essential oils and their major components against Acanthoscelides obtectus Say (Coleoptera: Bruchidae). *Journal of Plant Diseases and Protection*. 2020. Vol. 127, no. 5, p. 615-623. DOI 10.1007/s41348-020-00311-3.

HCINI, K., SOTOMAYOR, J.A., JORDAN, M.J. et BOUZID, S. Chemical Composition of the Essential Oil of Rosemary (Rosmarinus officinalis L.) of Tunisian Origin. *Asian Journal of Chemistry*. 2013. Vol. 25, no. 5, p. 2601-2603. DOI 10.14233/ajchem.2013.13506.

HUSNU, K., BASER, K.H.C., TABANCA, N., KIRIMER, N., BEDIR, E., KHAN, I. et WEDGE, D. Recent advances in the chemistry and biological activities of the Pimpinella species of Turkey. *Pure Appl. Chem.* 2007. Vol. 79, p. 539-556. DOI 10.1351/pac200779040539.

HUSSAIN, A.I., ANWAR, F., SHAHID, M., ASHRAF, M. et PRZYBYLSKI, R. Chemical Composition, and Antioxidant and Antimicrobial Activities of Essential Oil of Spearmint (Mentha spicata L.) From Pakistan. *Journal of Essential Oil Research*. 2010. Vol. 22, no. 1, p. 78-84. DOI 10.1080/10412905.2010.9700269.

IANNARELLI, R., MARINELLI, O., MORELLI, M.B., SANTONI, G., AMANTINI, C., NABISSI, M. et MAGGI, F. Aniseed (Pimpinella anisum L.) essential oil reduces pro-inflammatory cytokines and stimulates mucus secretion in primary airway bronchial and tracheal epithelial cell lines. *Industrial Crops and Products*. 2018. Vol. 114, p. 81-86. DOI 10.1016/j.indcrop.2018.01.076.

IBIN. Mentha spicata L. *IBIN-Medicinal & aromatic plants web information system (MAP-WIS)* [en ligne]. [Consulté le 2 septembre 2021]. Consulté à l'adresse: https://cimap.res.in/ibin/view_details.php?key=Mzcy

ISO. Huile essentielle de menthe verte ou de menthe crépue (*Mentha spicata* Linnaeus). *ISO* [en ligne]. [Consulté le 19 juin 2021]. Consulté à l'adresse: <https://www.iso.org/fr/standard/8119.html>

JOSHI, R.K. Pulegone and Menthone Chemotypes of *Mentha spicata* Linn. from Western Ghats Region of North West Karnataka, India. *National Academy Science Letters*. 2013. Vol. 36, no. 3, p. 349-352. DOI 10.1007/s40009-013-0141-3.

KARAWYA, M.S., EL DEEB, S.M., WAHBA, S. et EBEID, F. Analysis of some essential oils by gas-liquid partition chromatography. *Journal of Pharmaceutical Sciences United Arab Republic*. 1962. Vol. 3, no. 1, p. 63-79.

KHIARI, M. *Etude de l'effet de Mentha et Pistacia sur la toxicité du Nickel*. Thèse de Doctorat. Annaba: Université d'Annaba. 2018. 167 p.

KHUBEIZ, M.J. et BAHERA, Z. Essential Oil Composition of Syrian Aniseed (*Pimpinella anisum* L.). 2020. *مجلة جامعة دمشق للعلوم الأساسية*. No. 2, p. 9.

KIVÇAK, B., AKAY, S., DEMIRCI, B. et BAŞER, K. Chemical Composition of Essential Oils from Leaves and Twigs of *Pistacia lentiscus*, *Pistacia lentiscus* var. *chia*, and *Pistacia terebinthus* from Turkey. *Pharmaceutical Biology*. 2008. Vol. 42, no. 4-5, p. 360-366. DOI 10.1080/13880200490519677.

KIZIL, S. et TONÇER, Ö. Influence of different harvest times on the yield and oil composition of spearmint (*Mentha spicata* L. var. *spicata*). *Journal of Food Agriculture and Environment*. 2006. Vol. 4, no. 3 & 4, p. 135-137.

KOKATE, C.K., PUROHIT, A.P. et GOKHALE, S.B. *Pharmacognosy*. Nirali Prakashan. 2010. 635 p. ISBN 81-85790-09-4.

KOLIOPOULOS, G., PITAROKILI, D., KIOULOS, E., MICHAELAKIS, A. et TZAKOU, O. Chemical composition and larvicidal evaluation of *Mentha*, *Salvia*, and *Melissa* essential oils against the West Nile virus mosquito *Culex pipiens*. *Parasitology Research*. 2010. Vol. 107, no. 2, p. 327-335. DOI 10.1007/s00436-010-1865-3.

KOUL, V., GANDOTRA, B.M., KOUL, S., GHOSH, S., TIKOO, C.L. et GUPTA, A.K. Steam distillation of lemon grass (*Cymbopogon* spp.). *Indian J. Chem. Technol.* 2004. Vol. 11, no. 4, p. 135-139.

LADU, G., CUBAIU, L., D'HALLEWIN, G., PINTORE, G., PETRETTO, G.L. et VENDITTI, T. *Rosmarinus officinalis* L. and *Myrtus communis* L. essential oils treatments by vapor contact to control *Penicillium digitatum*. *Journal of Food Processing and Technology*. 2015. Vol. 6, no. 9, p. 492. DOI 10.4172/2157-7110.1000492.

LAMPARSKY, D., SCHENK, H.P. et KUBECZKA, K.H. *Proceeding of the 12th essential oil congress*. GeorgThieme Verlag. Stuttgart. 1982.

- LAWRENCE, B.M.** Progress in essential oils. Rosemary. (A monthly review). *Perfumer & Flavourist*. 1977. Vol. 2, no. 4, p. 34.
- LEPLAT, M.** *Le Romarin, Rosmarinus officinalis L., une Lamiacée médicinale de la garrigue provençale*. Thèse de doctorat : Pharmacie. Marseille: Université d'Aix-Marseille : Faculté de pharmacie. 2017. 229 p.
- LEŠNIK, S., FURLAN, V. et BREN, U.** Rosemary (*Rosmarinus officinalis L.*): extraction techniques, analytical methods and health-promoting biological effects. *Phytochemistry Reviews* [en ligne]. 2021. [Consulté le 15 avril 2021]. DOI 10.1007/s11101-021-09745-5. Consulté à l'adresse: <http://link.springer.com/10.1007/s11101-021-09745-5>
- LLORENS-MOLINA, J., GONZÁLEZ, S.V. et MARTÍNEZ, J.S.** Essential oil composition of leaves of *Pistacia lentiscus L.* growing wild in Valencia (Spain). *Geography*. 2015. Vol. 2, no. 4, p. 17-26.
- MAAROUI, Z., COJEAN, S., LOISEAU, P.M., YAHYAOU, M., AGNELY, F., ABDERRABA, M. et MEKHOLOUFI, G.** In vitro antileishmanial potentialities of essential oils from *Citrus limon* and *Pistacia lentiscus* harvested in Tunisia. *Parasitology Research*. 2021. Vol. 120, no. 4, p. 1455-1469. DOI 10.1007/s00436-020-06952-5.
- MAGIATIS, P., MELLIU, E., SKALTSOUNIS, A.L., CHINO, I.B. et MITAKU, S.** Chemical composition and antimicrobial activity of the essential oils of *Pistacia lentiscus* var. chia. *Planta Medica*. 1999. Vol. 65, no. 8, p. 749-752. DOI 10.1055/s-2006-960856.
- MALAYOGLU-BASMACIOGLU, H., OZDEMIR, P. et HAMES-KOCABAS, E.** Chemical composition and antibacterial activity of the essential oils of some plant species. *Ege. Univ. Ziraat. Fak.Derg.* 2011. Vol. 48, no. 1, p. 11-18.
- MC LAFFERTY, F.W. et STAUFFER, B.D.** *Wiley Registry of Mass Spectral Data, 6th ed., Mass spectrometry library search system BenchTop/PBM*. Palisade Co.: Newfield. 1994.
- MEBROUK, K., SAIBI, S., NACER-BEY, N. et BENYOUSSEF, E.-H.** Modelling of Water Distillation Kinetic of *Pistacia lentiscus L.* Essential Oil. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*. 2013. Vol. 15, no. 6, p. 980-987. DOI 10.1080/0972060X.2012.10662602.
- MECHERARA-IDJERI, S.** *Extraction des huiles essentielles de trois espèces de Pistacia : P. lentiscus L. , P. terebinthus L. , et P. atlantica Desf et caractérisation par CPG-SM et RMN C-13*. Doctorat d'état: Chimie. Alger: USTHB. 2007.
- MECHERARA-IDJERI, S., HASSANI, A., CASTOLA, V. et CASANOVA, J.** Composition and Chemical Variability of the Essential Oil from *Pistacia lentiscus L.* Growing Wild in Algeria: Part II: Fruit Oil. *Journal of Essential Oil Research*. 2008b. Vol. 20, p. 104-107. DOI 10.1080/10412905.2008.9699965.
- MECHERARA-IDJERI, S., HASSANI, A., CASTOLA, V. et CASANOVA, J.** Composition and chemical variability of the essential oil from *Pistacia lentiscus L.* growing

wild in Algeria Part 1: Leaf oil. *Journal of Essential Oil Research*. 2008a. Vol. 20, p. 32-38.

MEDJKANE, M., ALLEM, R., MEDJAHED, H., TALEB, F., MEROUANE, A. et MOUFFOK, F. Antimicrobial Activity of the Essential Oil Isolated from Pistacia lentiscus Leaves Against Helicobacter pylori Algerian Clinical Isolates. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*. 2016. Vol. 19, no. 2, p. 466-474. DOI 10.1080/0972060X.2015.1119659.

MENGAL, P. et MOMPON, B. Procédé et installation d'extraction sans solvant de produits naturels par micro-ondes [en ligne]. WO1994026853. 1994. [Consulté le 22 avril 2021]. Consulté à l'adresse: <https://patentscope.wipo.int/search/fr/detail.jsf?jsessionid=4EB258B15A31F1E972BAD5C5D19166AF.wapp2nC?docId=WO1994026853&tab=DRAWINGS>

MHARTI, F.Z., LYOUSSI, B. et ABDELLAOUI, A. Antibacterial Activity of the Essential Oils of Pistacia lentiscus Used in Moroccan Folkloric Medicine. *Natural Product Communications*. 2011. Vol. 6, no. 10, p. 1505-6. DOI 10.1177/1934578X1100601024.

MIESO, B. et BEFA, A. Physical Characteristics of the Essential Oil Extracted from Released and Improved Spearmint Varieties, Peppermint and Japanese Mint. *Medicinal & Aromatic Plants (Los Angeles)*. 2020. Vol. 9, no. 355, p. 4. DOI 10.35248/2167-0412.20.9.355.

MILIA, E., USAI, M., SZOTÁKOVÁ, B., ELSTNEROVÁ, M., KRÁLOVÁ, V., D'HALLEWIN, G., SPISSU, Y., BARBERIS, A., MARCHETTI, M., BORTONE, A., CAMPANELLA, V., MASTANDREA, G., LANGHANSOVÁ, L. et EICK, S. The Pharmaceutical Ability of Pistacia lentiscus L. Leaves Essential Oil Against Periodontal Bacteria and Candida sp. and Its Anti-Inflammatory Potential. *Antibiotics*. 2020. Vol. 9, no. 6, p. 281. DOI 10.3390/antibiotics9060281.

MIRALDI, E., GIACHETTI, D., MAZZONI, G. et BIAGI, M. Quali-quantitative analysis of eight Rosmarinus officinalis essential oils of different origin. First report. *Journal of the Siena Academy of Sciences*. 2010. Vol. 2, no. 1, p. 42-43. DOI 10.4081/jsas.2010.478.

MOGHADDAM, M. et MEHDIZADEH, L. Chemistry of Essential Oils and Factors Influencing Their Constituents. In: *Soft Chemistry and Food Fermentation*. 2017. p. 379-419. ISBN 978-0-12-811412-4.

MOHAMMED, M.S.A., TAWFIK, M.S.H. et EL-GOHARY, I.A. Influence of two extraction methods on essential oils of some Apiaceae family plants. *Egyptian Pharmaceutical Journal*. 2019. Vol. 18, p. 160-4. DOI 10.4103/epj.epj_25_18.

MOREL, J.-M. *Traité pratique de phytothérapie : remèdes d'hier pour médecin de demain*. Jacques Grancher. 2008. 618 p. Le corps et l'esprit. ISBN 978-2-7339-1043-6.

MORETTI, M.D.L., PEANA, A.T., SANNA PASSINO, G. et SOLINAS, V. Effects of soil properties on yield and composition of Rosmarinus officinalis essential oil. *Journal of*

Essential Oil Research. 1998. Vol. 10, no. 3, p. 261-267.
DOI 10.1080/10412905.1998.9700898.

MORIN, P., GUENTHER, C., PEYRON, L. et RICHARD, H. Etude des phénomènes physico-chimiques intervenant lors du procédé d'hydrodistillation. *Bull. Soc. Chim. de France*. 1985. Vol. 5, p. 921-930.

NACER-BEY, N. *Etude des huiles essentielles (essence végétale) de quelques plantes algériennes: Caractérisation chimique et valorisation agronomique*. Alger: INA. 2003.

NEGRO, C., DE BELLIS, L. et MICELI, A. Chemical composition and antioxidant activity of *Pistacia lentiscus* essential oil from Southern Italy (Apulia). *Journal of Essential Oil Research*. 2014. Vol. 27, no. 1, p. 23-29. DOI 10.1080/10412905.2014.973614.

NOWICKI, J. *Les dangers de l'utilisation abusive des huiles essentielles*. 2019.

ORAV, A., RAAL, A. et ARAK, E. Essential oil composition of *Pimpinella anisum* L. fruits from various European countries. *Natural Product Research*. 2007. Vol. 22, no. 3, p. 227-232. DOI 10.1080/14786410701424667.

OUAMBA, J.M. *Valorisation Chimique des Plantes Aromatiques du Congo: Extraction et analyse des huiles essentielles, Oximation des aldéhydes naturels*. Thèse de Doctorat d'État. Montpellier: Université de Montpellier II. 1988. 340 p.

OUTALEB, T. *Extraits de romarin d'Algérie (Rosmarinus officinalis L. et Rosmarinus tournefortii De Noe): Analyse chimique et activités antioxydantes et antimicrobiennes*. Thèse de doctorat: Sciences agronomiques. Alger: ENSA. 2016.

ÖZCAN, M.M. et CHALCHAT, J.C. Chemical composition and antifungal effect of anise (*Pimpinella anisum* L.) fruit oil at ripening stage. *Annals of Microbiology*. 2006. Vol. 56, no. 4, p. 353-358. DOI 10.1007/BF03175031.

ÖZEL, A. Anise (*Pimpinella anisum*): Changes in yields and component composition on harvesting at different stages of plant maturity. *Experimental Agriculture*. 2009. Vol. 45, no. 1, p. 117-126. DOI 10.1017/S0014479708006959.

PARÉ, J.J.R., SIGOUIN, M. et LAPOINTE, J. Extraction de produits naturels assistée par micro-ondes [en ligne]. EP0398798A2. 1990. Union Européenne. [Consulté le 22 avril 2021]. Consulté à l'adresse: <https://patents.google.com/patent/EP0398798A2/fr>

PERROT, É. *Plantes médicinales de France: Notice sur le choix, la récolte, le séchage et le commerce, accompagnant le premier volume des planches en couleurs* [en ligne]. Paris: impr. L. Maretheux. 1928. [Consulté le 31 mai 2021]. 64 p. Travaux de l'Office national des matières premières végétales, 26. Consulté à l'adresse: <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3048465w>
Tolbiac - Rez de Jardin - Sciences et technique - Magasin - 8-S-16151 (26)

- PINTORE, G., USAI, M., BRADESI, P., JULIANO, C., BOATTO, G., TOMI, F., CHESSA, M., CERRI, R. et CASANOVA, J.** Composition and antimicrobial activity of *Rosmarinus officinalis* L. oils from Sardinia and Corsica (a-pinene/verbenone/bornyl acetate chemotype). *Flavour and Fragrance Journal*. 2002. Vol. 17, p. 15-19. DOI 10.1002/ffj.1022.
- PIOCHON, M.** *Etude des huiles essentielles d'espèces végétales de la flore Laurentienne : Composition chimique, activités pharmacologiques et hémi-synthèse*. Mémoire de fin d'étude : Maîtrise en ressources renouvelables. Quebec: Université du Quebec. 2008. 213 p.
- POLESE, J.M.** *La culture des plantes aromatiques*. Artémis. 2006. 94 p.
- PROGRAMME D'INITIATIVE.** *Programme d'initiative communautaire Corse-Sardaigne. Secteur A1, Agroalimentaire. Thème 2 : Composés naturels d'origine végétale de Corse et de Sardaigne*. 1993. Rapport d'activité.
- QUEZEL, P. et SANTA, S.** *Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales, Tome II*. Paris. 1963.
- RASSEM, H.H.A., NOUR, A.H. et YUNUS, R.M.** Techniques for extraction of essential oils from plants : A review. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2016. Vol. 10, no. 16, p. 117-127.
- RHYU, H.Y.** Gas chromatographic characterisation of oregano and other selected spices of the labiate family. *Journal of Food Science*. 1979. Vol. 44, no. 5, p. 1373-1378.
- ROMDHANE, M., HEDHILI, L., TIZAOUL, C., GADRI, A., GOURDON, C., CASAMATTA, G., OUEDERNI, A. et ABDERABBA, M.** *Design of a new vapodistillation unit: essential oil extraction from anis seeds and material transfer modeling* [en ligne]. 2001. Consulté à l'adresse: https://www.researchgate.net/publication/339941186_DESIGN_OF_A_NEW_VAPODISTILLATION_UNIT_ESSENTIAL_OIL_EXTRACTION_FROM_ANIS_SEEDS_AND_MATERIAL_TRANSFER_MODELING
- SAHRAOUI, N., VIAN, M., BORNARD, I., BOUTEKEDJIRET, C. et CHEMAT, F.** Improved microwave steam distillation apparatus for isolation of essential oils. Comparison with conventional steam distillation. *Journal of chromatography. A*. 2008. Vol. 1210, no. 2, p. 229-33. DOI 10.1016/j.chroma.2008.09.078.
- SAIBI, S.** *Etude de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle d'Anis vert et de ses constituants majoritaires. Modélisation du transfert de matière lors de l'hydrodistillation*. Mémoire de Magistère : Biotechnologie et environnement. Alger: Ecole Nationale Polytechnique. 2012.
- SAIBI, S., BELHADJ, M. et BENYOUSSEF, E.-H.** Essential Oil Composition of *Pimpinella anisum* from Algeria. *Analytical Chemistry Letters*. 2013. Vol. 2, no. 6, p. 401-404. DOI 10.1080/22297928.2012.10662624.

SANDRA, P. et **BICCHI, C.** *Capillary gas chromatography in essential oil analysis.* 1987.

SATTA, M., TUBEROSO, C.I.G. et **MORETTI, M.D.L.** Preliminary investigation on samples of essential oil of *Rosmarinus Officinalis L.* produced in Sardinia. *Rivista Ital. EPPOS.* 1997. Vol. 22, p. 13-18.

SCHOLZ, A. Lentisque, Albufeira, Algarve, Portugal, (Pistacia lentiscus Photo Stock). *Alamy* [en ligne]. [Consulté le 2 septembre 2021]. Consulté à l'adresse: <https://www.alamyimages.fr/photo-image-lentisque-albufeira-algarve-portugal-pistacia-lentiscus-130886245.html>

SCHWENKER, G. et **KLOEHN, W.** Gas chromatographic studies on the composition of *Rosmarinus* oils. *Arch. Pharm. Ber. Dtch. Pharm. Ges.* 1963. Vol. 296, p. 844-854.

SEIGNE. Technique agricole et production. In: *La forêt circumméditerranéenne et ses problèmes.* Maisonneuve GP et Larose. 1985.

SELL, C.S. *The Chemistry of Fragrance. From Perfumer to Consumer. 2nd édition.* Cambridge: The Royal Society of Chemistry. 2006. 329 p.

SELMİ, H., DHİFALLAH, A., BAHRI, A., JEDIDI, S., ABBES, C. et **ROUISSI, H.** Chemical composition, antioxidant and antibacterial activities of *Pistacia lentiscus* and *Rosmarinus officinalis* essentials oils. *Journal of New Sciences.* 2020. Vol. 69, no. 13, p. 4247-4258.

SHAMSUN, N., APU, G. et **SHAHIN, A.** Comparative Studies on Physicochemical Properties and GC-MS Analysis of Essential Oil of the Two Varieties of the Aniseed (*Pimpinella anisum Linn.*) in Bangladesh. *International Journal of Pharmaceutical and Phytopharmacological Research.* 2012. Vol. 2, no. 2, p. 92-95.

SINGH, G., KAPOOR, I.P.S., SINGH, P., DE HELUANI, C.S. et **CATALAN, C.A.N.** Chemical composition and antioxidant potential of essential oil and oleoresins from anise seeds (*Pimpinella anisum L.*). *International Journal of Essential Oil Therapeutics.* 2008. Vol. 2, p. 10.

SKRUBIS, B.G. Seven wild aromatic plants growing in Greece and their essential oils. *Flav. Indust.* 1972. Vol. 3, no. 11, p. 566-568, 571.

SMALL, E. et **DEUTSCH, G.** *Herbes culinaires pour nos jardins de pays froid.* ISMANTPEONY PRESS. Canada. 2001. 192 p.

SMITH, R.L., COHEN, S.M., DOULL, J., FERON, V.J., GOODMAN, J.I., MARNETT, L.J., PORTOGHESE, P.S., WADDELL, W.J., WAGNER, B.M., HALL, R.L., HIGLEY, N.A., LUCAS-GAVIN, C. et **ADAMS, T.B.** A procedure for the safety evaluation of natural flavor complexes used as ingredients in food: essential oils. *Food and Chemical Toxicology: An International Journal Published for the British Industrial Biological Research Association.* 2002. Vol. 43, no. 3, p. 345-363. DOI 10.1016/j.fct.2004.11.007.

SNOUSSI, M., NOUMI, E., TRABELSI, N., FLAMINI, G., PAPETTI, A. et DE FEO, V. Mentha spicata Essential Oil: Chemical Composition, Antioxidant and Antibacterial Activities against Planktonic and Biofilm Cultures of Vibrio spp. Strains. *Molecules*. 2015. Vol. 20, no. 8, p. 14402-14424. DOI 10.3390/molecules200814402.

SOVOVÁ, H. et ALEKSOVSKI, S.A. Mathematical model for hydrodistillation of essential oils. *Flavour and Fragrance Journal*. 2006. Vol. 21, no. 6, p. 881-889. DOI 10.1002/ffj.1729.

STASHENKO, E.E., JARAMILLO, B.E. et MARTÍNEZ, J.R. Analysis of volatile secondary metabolites from Colombian Xylopia aromatica (Lamarck) by different extraction and headspace methods and gas chromatography. *Journal of Chromatography A*. 2004. Vol. 1025, no. 1, p. 105-113. DOI 10.1016/j.chroma.2003.10.059.

STECHER, P.G., FINKEL, M.J. et SIEGMUND, O.H. The merck index of chemicals and drugs. 7th ed. Merck & Co., Inc., RAHWAY, N.J. (éd.), *Journal of the American Pharmaceutical Association (Scientific ed.)*. 1960. Vol. 49, no. 6, p. 409. DOI 10.1002/jps.3030490627.

STONE, S. Anis (Pimpinella anisum Photo Stock - Alamy). [en ligne]. [Consulté le 2 septembre 2021]. Consulté à l'adresse: <https://www.alamyimages.fr/anis-pimpinella-anisum-image334693557.html>

SUKHDEV SWAMI, H., SUMAN PREET SINGH, K., GENNARO, L. et DEV DUTT, R. *Extraction Technologies for Medicinal and Aromatic Plants*. International Centre for Science and High Technology. Trieste. 2008.

SULIEMAN, A.M.E., ABDELRAHMAN, S.E. et ABDEL RAHIM, A.M. Phytochemical Analysis of Local Spearmint (Mentha spicata) Leaves and Detection of the Antimicrobial Activity of its Oil. *Journal of Microbiology Research*. 2012. Vol. 1, no. 1, p. 1-4. DOI 10.5923/j.microbiology.20110101.01.

TALAHAGCHA, Kh. et KASSA, S. *Extraction et caractéristiques organoleptiques et chimiques de l'huile essentielle de Mentha pulegium (menthe pouliot)*. D.E.S en biologie. 2008.

TALEB-TOUDERT, K. *Extraction et caractérisation des huiles essentielles de dix plantes aromatiques provenant de la région de Kabylie (Nord Algérien). Evaluation de leurs effets sur la bruche du niébé Callosobruchus maculatus (Coleoptera : Bruchidae)*. Thèse de Doctorat: Sciences biologiques. Tizi-Ouzou: Université de Mouloud Mammeri : Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques. 2015.

TCHAMDJA, K.M. *Etude de performance d'un extracteur artisanal pour la production d'essence de citronnelle*. Mémoire de fin d'étude : Ingénieur des travaux biologiques. Paris: ESTBA UB. 1995. 95 p.

TELCI, I., DEMIRTAS, I., BAYRAM, E., ARABACI, O. et KACAR, O. Environmental variation on aroma components of pulegone/piperitone rich spearmint (Mentha spicata L.).

Industrial Crops and Products. 2010. Vol. 32, no. 3, p. 588-592. DOI 10.1016/j.indcrop.2010.07.009.

TEUSCHER, E., ANTON, R. et LOBSTEIN, A. *Plantes aromatiques : Epices, aromates, condiments et huiles essentielles*. Tec et Doc. Paris: Lavoisier. 2005. 544 p.

TOMI, F., BRADESI, P., BIGHELLI, A. et CASANOVA, J. Computer-aided identification of individual components of essential oils using Carbon-13 NMR spectroscopy. *J. Magn. Reson. Analysis*. 1995. Vol. 1, p. 25-34. DOI hal-00289736.

TORCK, M. et TORTINE, F. *Plantes médicinales des régions tempérées*. 1980. Maloine.S.A.,

TUBEROSO, C.I.G., SATTA, M., CABRAS, P. et GARAU, V.L. Chemical composition of *Rosmarinus officinalis* oils of Sardinia. *Journal of Essential Oil Research*. 1998. Vol. 10, no. 6, p. 660-664. DOI 10.1080/10412905.1998.9701002.

ULLAH, H., MAHMOOD, A., AWAN, M. et HONERMEIER, B. Effect of row spacing and seed rate on fruit yield, essential oil and composition of anise (*Pimpinella anisum* L.). *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*. 2013. Vol. 52, p. 349-357.

USAI, M., MARCHETTI, M., FODDAI, M., DEL CARO, A., DESOGUS, R., SANNA, I. et PIGA, A. Influence of different stabilizing operations and storage time on the composition of essential oil of thyme (*Thymus officinalis* L.) and rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.). *Journal of Food Science and Technology*. 2011. Vol. 44, no. 1, p. 244-249. DOI 10.1016/j.lwt.2010.05.024.

VIEIRA, J.N., GONÇALVES, C.L., VILLARREAL, J.P.V., GONÇALVES, V.M., LUND, R.G., FREITAG, R.A., SILVA, A.F. et NASCENTE, P.S. Chemical composition of essential oils from the apiaceae family, cytotoxicity, and their antifungal activity in vitro against candida species from oral cavity. *Brazilian Journal of Biology*. 2019. Vol. 79, no. 3, p. 432-437. DOI 10.1590/1519-6984.182206.

VINATORU, M. An overview of the ultrasonically assisted extraction of bioactive principles from herbs. *Ultrasonics sonochemistry*. 2001. Vol. 8, p. 303-13. DOI 10.1016/S1350-4177(01)00071-2.

WALTER, A. et LEBOT, V. *Jardin d'Océanie*. IRD Editions. Paris. 2003. 320 p.

WHO. *WHO guidelines for assessing quality of herbal medicines with reference to contaminants and residues* [en ligne]. World Health Organization. 2007. [Consulté le 8 juin 2021]. ISBN 978-92-4-159444-8. Consulté à l'adresse: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/43510>

WINTER, M. *Blossoming rosemary plants in the herb garden* [en ligne]. 2020. Consulté à l'adresse: https://www.123rf.com/photo_56360865_blossoming-rosemary-plants-in-the-herb-

garden-selected-focus-narrow-depth-of-field.html

YAHIAOUI, N. *Extraction, analyse et évaluation de l'effet insecticide des huiles essentielles de Mentha spicata L. sur Rhizopertha dominica (F) (Coleoptera, Bostrychidae) et Tribolium confusium.* Magister. Alger: ENSA. 2005. 102 p.

YAMINI, Y., BAHRAMIFAR, N., SEFIDKON, F., SAHARKHIZ, M.J. et SALAMIFAR, E. Extraction of essential oil from Pimpinella anisum using supercritical carbon dioxide and comparison with hydrodistillation. *Natural Product Research.* 2006. Vol. 22, no. 3, p. 212-218. DOI 10.1080/14786410601130349.

YAN, F., BEYER, E.M., AZIZI, A. et HONERMEIER, B. Effects of sowing time and sowing density on fruit yield, essential oil concentration and composition of anise (Pimpinella anisum L.) under field conditions in Germany. *Zeitschrift fur Arznei- und Gewurzpflanzen.* 2011. Vol. 16, p. 26-33.

ZEINALI, H., ARZANI, A., RAZMJOO, K. et REZAEI, M.B. Evaluation of Oil Compositions of Iranian Mints (Mentha spp.). *Journal of Essential Oil Research.* 2005. Vol. 17, no. 2, p. 156-159. DOI 10.1080/10412905.2005.9698863.

ZHAO, D., XU, Y.W., YANG, G.L., HUSAINI, A.M. et WU, W. Variation of essential oil of Mentha haplocalyx Briq. and Mentha spicata L. from China. *Industrial Crops and Products.* 2013. Vol. 42, p. 251-260. DOI 10.1016/j.indcrop.2012.06.010.