



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

Ecole Nationale Polytechnique  
Département de Génie Chimique  
Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles

*LAVALEF*

# Thèse de Doctorat en Génie Chimique

**Option : Génie Chimique**

Présentée par :

**BESSAH Rahma**

Magister en Ecologie et Environnement de l'USTHB

**Intitulée**

## **Evaluation du potentiel d'économie d'énergie dans les procédés d'extraction et intégration des énergies renouvelables**

Soutenue publiquement le **27 /06 /2013** devant le jury composé de :

|                     |                    |                        |       |
|---------------------|--------------------|------------------------|-------|
| <b>Président :</b>  | DERRICHE Ratiba    | Professeur             | ENP   |
| <b>Rapporteur :</b> | BENYOUSSEF El-Hadi | Professeur             | ENP   |
| <b>Examineurs :</b> | BENTAHAR Fatiha    | Professeur             | USTHB |
|                     | AZIZA Majda Amina  | Directeur de Recherche | CDER  |
|                     | HADJ-ARAB Amar     | Directeur de Recherche | CDER  |
| <b>Invités :</b>    | DALI Kamel         | Directeur projets      | APRUE |

**ENP 2013**

Ecole Nationale Polytechnique (ENP)

## تقييم القدرة على توفير الطاقة في عمليات استخراج ودمج الطاقات المتجددة

**الملخص:** هذه الرسالة هي جزء من منظور البحث في توفير الطاقة من أجل تحسين الفعالية الطاقوية، حماية البيئة وتوفير المياه في عمليات استخراج وتمهيد الطريق لإدماج الطاقات المتجددة. كخطوة أولى أجرينا استخراج، توصيف ورصد حركية استخراج الزيوت الأساسية من نبتتين: *Arbutus unedo L*, *Erica arborea L*، حيث أخذت العينات من غابة بابنام غرب الجزائر العاصمة. في الخطوة الثانية، قمنا بتقييم إمكانية إدماج الطاقات المتجددة في عملية استخراج الزيوت الأساسية باستخدام التقطير المائي، هذا يتعلق بإنتاج البخار عن طريق حرق الكتلة الحيوية، من أجل ذلك قمنا بتصميم وتصنيع فرن بوقود حيوي مزود بجهاز لتوليد البخار. ثم أجرينا سلسلة من تجارب الحرق لقياس قوة تدفق البخار، الحرارة والمردود. و اقترح نمذجة آليات تحويل المادة من المرحلة الصلبة إلى المرحلة السائلة و نمذجة طاوقية للتقطير المائي. أما في مرحلة أخرى ولأجل توفير المياه اعتمدنا على تعويض مياه التبريد الضرورية لتكثيف البخار بهواء متحصل عليه بمراوح تعمل بالطاقة الشمسية. لهذا قمنا بتصميم رقمي لمكثف مبرد بالهواء. أخيرا اقترحنا إنشاء جهاز متحرك ذاتي للتحكم لاستخراج الزيوت الأساسية سواء من ناحية الطاقة أو استعمال الماء وذلك بإدراج مختلف مصادر الطاقات المتجددة.

**الكلمات المفتاحية:** الطاقات المتجددة، عمليات الاستخراج، الفعالية الطاقوية، الزيوت الأساسية، مكثف الهواء، وحدة متنقلة.

### Evaluation du potentiel d'économie d'énergie dans les procédés d'extraction et intégration des énergies renouvelables

**Résumé :** Ce travail de thèse s'inscrit dans une optique de recherche de gains d'énergie en vue d'une amélioration de l'efficacité énergétique, du respect de l'environnement et d'économie d'eau dans les procédés d'extraction et ouvrant la voie à l'intégration des énergies renouvelables. Dans un premier temps, nous avons procédé à l'extraction, caractérisation et suivi des cinétiques d'extraction des huiles essentielles de deux plantes du pourtour méditerranéen qui sont *Arbutus unedo L* et *Erica arborea L*. Dans un deuxième temps, nous avons évalué le potentiel d'intégration des énergies renouvelables dans le procédé d'extraction des huiles essentielles par hydrodistillation. Cette intégration concerne la production de vapeur par combustion de la biomasse. Un brûleur à biomasse équipé d'un dispositif de production de vapeur a été dimensionné et réalisé. Les résultats obtenus en termes d'évolution du rendement en fonction de la durée d'extraction ont été comparés à ceux obtenus par la méthode classique utilisant un chauffage électrique. Une modélisation des mécanismes de transfert de matière de la phase solide vers la phase liquide ainsi qu'une modélisation énergétique de l'hydrodistillation sont proposées. Dans un dernier temps, nous avons montré la possibilité de substitution de l'eau utilisée généralement comme fluide de refroidissement dans un condenseur, par de l'air fourni par des ventilateurs alimentés à l'énergie solaire photovoltaïque. Une projection industrielle des résultats obtenus au cours de cette étude est réalisée à travers la conception d'une unité d'extraction mobile, autonome en énergie et en eau.

**Mots clés :** énergies renouvelables, procédés d'extraction, efficacité énergétique, huiles essentielles, aérocondenseur, unité mobile

### Evaluation of potential energy savings in the extraction process and integration of renewable energies

**Abstract:** This thesis is part of a research perspective of energy savings to improved energy efficiency, environmental protection and water saving in extraction processes and opening the way for the integration of renewable energies. As a first step, we performed the extraction, characterization and monitoring of essential oils kinetics extraction of two Mediterranean plants, *Arbutus unedo L* and *Erica arborea L*. in a second step, we evaluated the renewable energies potential integration in the essential oils extraction process by hydrodistillation. A biomass burner equipped with a steam was dimensioned and manufactured. The results in terms of essential oil yield depending on the duration of extraction were compared with those obtained by the conventional method using an electric heater. Modeling mechanisms of mass transfer from the solid phase to the liquid phase as well as energy modeling of hydrodistillation are proposed. In a last step, we have shown the possibility of substitution of water commonly used as a coolant in a condenser by air supplied by fans powered by photovoltaic solar energy. Industrial Projection of results obtained in this study is achieved through the design of a mobile unit extraction autonomous with energy and water

**Keywords:** renewable energy extraction processes, energy efficiency, essential oils, air condenser, mobile unit

## Remerciements

Tout d'abord, je voudrais adresser mes remerciements à mon Directeur de thèse, Monsieur le Professeur El-Hadi BENYOUSSEF, pour toute la confiance qu'il a bien voulu placer en moi, pour m'avoir confié ce travail de recherche, et pour son aide précieuse dans le déroulement de ma thèse.

Les travaux réalisés lors de cette thèse sont les résultats d'une collaboration entre la Division Bioénergie et Environnement du Centre de Développement des Energies Renouvelables et le Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles du Département Génie Chimique de l'Ecole Nationale Polytechnique. Je remercie le Directeur du CDER, le professeur Nourredine YASSAA, pour les moyens qu'il a mis à ma disposition ainsi que l'ensemble du personnel du CDER qui m'ont encouragé, soutenu et conforté tout au long de ce travail.

Toute ma reconnaissance est pour Madame Ratiba DERRICHE, Professeur à l'ENP, pour l'intérêt qu'elle a porté à mon travail et pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance de cette thèse.

Je tiens particulièrement à exprimer ma gratitude envers Mme le Professeur Fatiha BENTAHAR pour m'avoir fait l'honneur d'être membre du jury de soutenance de cette thèse.

Je remercie vivement Madame Majda Amina AZIZA, Directrice de Recherche au CDER, pour tous les efforts qu'elle déploie dans la gestion du laboratoire Bioénergie et Environnement et d'avoir participé à l'évaluation de mon travail.

Mes remerciements vont également vers Monsieur Amar HADJ-ARAB, Directeur de Recherche au CDER, qui a contribué à l'évaluation de ma thèse. Ses connaissances dans le domaine du photovoltaïque me seront, sans doute, d'un apport bénéfique.

Je remercie Monsieur Kamel DALI, Directeur Projets au niveau de l'Agence de Promotion et de Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie, d'avoir accepté d'être membre du jury de soutenance de cette thèse

Je voudrais exprimer mes remerciements à Ouahid ZENDOUCHE de l'Institut National de la Recherche Forestière pour son aide précieuse lors des sorties sur terrain. Je remercie également Mourad CHERGUI d'avoir participer aux campagnes d'échantillonnage. Merci à Sid Ahmed HOUMIL pour ces excellents dessins industriels.

Je remercie particulièrement mes amis Djaffar, Samy, Insaf, Doria, Karima, Amel, Hafida, Ghania et Hamida pour leur soutien inestimable, leur patience et leur disponibilité.

Mes vifs remerciements et ma reconnaissance vont, enfin, vers mes parents, mes frères et sœurs pour leur soutien sincère et dévoué.

*Résumés*

*Remerciements*

*Liste des abréviations*

*Listes des tableaux et figures*

|                    |   |
|--------------------|---|
| INTRODUCTION ..... | 1 |
|--------------------|---|

### **Chapitre 1: La filière des huiles essentielles : Impacts et enjeux socioéconomiques**

|   |    |
|---|----|
| 1. Secteurs d'application des huiles essentielles.....        | 4  |
| 1.1 Industrie des cosmétiques, savonneries et parfums.....    | 4  |
| 1.2 Industrie alimentaire .....                               | 4  |
| 1.3 Industrie pharmaceutique.....                             | 5  |
| 1.4 Autres domaines d'application .....                       | 7  |
| 2. Marché mondial des huiles essentielles.....                | 7  |
| 2.1 Les exportations.....                                     | 8  |
| 2.2 Les importations .....                                    | 8  |
| 3. La filière des huiles essentielles en Algérie .....        | 10 |
| 3.1 Etat des lieux.....                                       | 10 |
| 3.2 Commercialisation des huiles essentielles en Algérie..... | 13 |
| 3.2.1 Les exportations.....                                   | 13 |
| 3.2.2 Les importations .....                                  | 16 |
| Conclusion .....  | 20 |

### **Chapitre 2: Les huiles essentielles : définition, composition et procédés d'extraction**

|  |    |
|--|----|
| 1. Les huiles essentielles.....                              | 21 |
| 1.1 Histoire .....   | 21 |
| 1.2 Définition des huiles essentielles .....                 | 22 |
| 1.3 Localisation des huiles essentielles dans la plante..... | 22 |
| 1.4 Composition biochimique des huiles essentielles .....    | 23 |
| 1.5 Effets biologiques des huiles essentielles .....         | 23 |
| 1.6 Les chémotypes .....                                     | 24 |
| 2. Extraction des huiles essentielles.....                   | 24 |
| 2.1 La distillation à la vapeur et ses variantes.....        | 24 |
| 2.1.1 Mécanisme de la distillation .....                     | 24 |
| 2.1.2 L'hydrodistillation .....                              | 27 |
| 2.1.3 L'entraînement à la vapeur d'eau .....                 | 28 |
| 2.1.4 L'hydrodiffusion.....                                  | 29 |
| 2.1.5 La turbodistillation.....                              | 29 |

|  |    |
|--|----|
| 2.2 L'expression à froid.....  | 30 |
| 3. Méthodes d'extractions modernes .....                                     | 31 |
| 3.1 Extraction par micro-ondes.....  | 31 |
| 3.2 Procédés d'extraction et énergies renouvelables.....                     | 36 |
| 4. Equipements d'une unité classique d'extraction d'huiles essentielles..... | 38 |
| 4.1 L'alambic ou cuve de distillation.....                                   | 38 |
| 4.2 Le condenseur.....   | 39 |
| 4.3 L'essencier ou le vase florentin .....                                   | 40 |

### **Chapitre 3: Les huiles essentielles d'*Arbutus unedo* L. et d'*Erica arborea* L.**

|  |    |
|--|----|
| 1. Lieu de végétation.....                                   | 42 |
| 2. Le matériel végétal .....                                 | 44 |
| 2.1 <i>Arbutus unedo</i> L.....                              | 44 |
| 2.1.1 Description morphologique .....                        | 44 |
| 2.1.2 Usages de l'arbousier.....                             | 46 |
| 2.2 <i>Erica arborea</i> L. ....                             | 49 |
| 2.2.1 Description morphologique .....                        | 49 |
| 2.2.2 Usages de la bruyère.....                              | 49 |
| 3. Extraction des huiles essentielles.....                   | 52 |
| 3.1 Mise en œuvre de l'hydrodistillation .....               | 52 |
| 3.2 Analyse CG/MS.....                                       | 54 |
| 3.3 Identification des constituants.....                     | 55 |
| 4. Résultats et discussion .....                             | 56 |
| 4.1 Les huiles essentielles de l'arbousier .....             | 56 |
| 4.1.1 Composition chimique.....                              | 56 |
| 4.1.2 Cinétique d'extraction .....                           | 59 |
| 4.2 Les huiles essentielles de la bruyère arborescente ..... | 62 |
| 4.2.1 Composition chimique.....                              | 62 |
| 4.2.2 Cinétique d'extraction.....                            | 65 |

### **Chapitre 4: Potentiel d'intégration des énergies renouvelables dans le procédé d'extraction des huiles essentielles**

|  |    |
|--|----|
| 1. Maîtrise de la consommation d'énergie lors de l'hydrodistillation .....   | 67 |
| 1.2.1 Calcul des pertes de puissance.....                                    | 68 |
| 1.2.2 Débit de vapeur et apport énergétique .....                            | 70 |
| 2. Evaluation de la quantité de vapeur générée par la biomasse .....         | 71 |
| 2.1 Dimensionnement, conception et réalisation d'un brûleur à biomasse ..... | 71 |

|  |    |
|--|----|
| 2.1.1 Dimensionnement du brûleur.....  | 72 |
| 2.1.2 Réalisation du brûleur.....  | 76 |
| 2.2 Mesure de la quantité de vapeur générée par la biomasse .....            | 77 |
| 2.2.1 Conditions expérimentales.....   | 77 |
| 2.2.2 Résultats et discussion .....  | 78 |
| 2.3 Efficacité énergétique du brûleur.....                                   | 79 |
| 2.4 Potentiel d'intégration de la biomasse dans le procédé d'extraction..... | 80 |
| 2.5 Coût, énergie et impact environnemental .....                            | 83 |
| Conclusion .....   | 83 |

### **Chapitre 5: Cinétiques d'extraction et modélisation énergétique**

|  |     |
|--|-----|
| 1. Cinétiques d'extraction des huiles essentielles.....  | 85  |
| 1.1 Cinétique d'extraction à différents débits de vapeur.....                                      | 85  |
| 1.2 Evolution du rendement en fonction de l'apport énergétique .....                               | 87  |
| 2. Modélisation des données cinétiques.....  | 87  |
| 2.1 Compréhension de l'extraction solide-liquide .....   | 87  |
| 2.2 Les modèles mathématiques .....  | 89  |
| 2.2.1 Les modèles à une constante de temps .....   | 89  |
| 2.2.2 Les modèles à plus d'une constante de temps .....  | 92  |
| 2.3 Modélisation des cinétiques d'extraction de l'huile essentielle d' <i>Arbutus unedo</i> L..... | 93  |
| 2.3.1 Cinétiques d'extraction.....   | 93  |
| 2.3.2 Détermination des vitesses d'extraction .....  | 95  |
| 2.3.3 Modélisation énergétique.....  | 97  |
| Conclusion .....   | 101 |

### **Chapitre 6: Aérocondensation et projection industrielle**

|   |     |
|---|-----|
| 1. L'aérocondensation.....  | 102 |
| 1.1 Description d'un aérocondenseur .....                                     | 103 |
| 1.2 Principe de dimensionnement thermique d'un aérocondenseur.....            | 104 |
| 1.2.1 Détermination du coefficient de transmission thermique global $U$ ..... | 105 |
| 1.2.2 Détermination de la quantité de chaleur totale à évacuer .....          | 105 |
| 1.2.3 Détermination de la masse volumique de l'air .....                      | 106 |
| 1.2.4 Détermination de la quantité de chaleur échangée dans la cellule.....   | 106 |
| 1.2.5 Détermination de la température de sortie de l'air.....                 | 106 |
| 1.2.6 Détermination du nombre de cellules requises pour le service.....       | 107 |
| 1.2.7 Détermination de la surface nécessaire par cellule .....                | 107 |
| 1.3 Dimensionnement des ventilateurs .....                                    | 108 |

|  |     |
|--|-----|
| 1.4 Résultats de dimensionnement de l'aérocondenseur.....          | 109 |
| 1.4.1 Débit d'air ( $D_2$ ).....                                   | 109 |
| 1.4.2 Calcul de la surface d'échange et coefficient d'échange..... | 110 |
| 1.4.3 Le coefficient d'échange global U.....                       | 110 |
| 1.4.4 La surface d'échange.....                                    | 112 |
| 1.5 Disposition du système de ventilation et du serpentín.....     | 112 |
| 1.5.1 Configuration 1.....   | 114 |
| 1.5.2 Configuration 2.....   | 114 |
| 1.6 Détermination des besoins de chaque ventilateur.....           | 116 |
| 2. Dimensionnement photovoltaïque.....                             | 117 |
| 2.1 L'irradiation solaire.....                                     | 118 |
| 2.2 La production d'électricité.....                               | 119 |
| 2.3 Détermination de la surface des panneaux Photovoltaïques.....  | 121 |
| 3. Projection industrielle.....                                    | 122 |
| 3.1 Les atouts du Mobilab.....                                     | 123 |
| 3.1.1 Autonomie énergétique.....                                   | 123 |
| 3.1.2 Autonomie en eau.....  | 123 |
| 3.1.3 Mobilité.....  | 123 |
| 3.2 Capacité d'extraction des Mobilab.....                         | 125 |
| 3.3 Dimensionnement du Mobilab.....                                | 126 |
| 3.3.1 La chaudière.....  | 126 |
| 3.3.2 L'extracteur.....  | 126 |
| 3.3.3 Le condenseur.....   | 126 |
| 3.3.4 Détermination des besoins des ventilateurs.....              | 127 |
| 3.3.5 La surface du module Photovoltaïque.....                     | 128 |
| Conclusion.....  | 133 |
| CONCLUSION GENERALE.....   | 134 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES  |     |

## Liste des Abréviations

|                           |   |
|---------------------------|---|
| <b>A<sub>s</sub></b> :    | Surface d'échange d'une cellule aérocondenseur (m <sup>2</sup> )                              |
| <b>C<sub>2</sub></b> :    | Capacité thermique massique de l'air (J/kg.K)   |
| <b>C<sub>E</sub></b> :    | Couverture des besoins énergétiques en fonction de la surface disponible                      |
| <b>C<sub>p</sub></b> :    | Chaleur massique de l'eau (kJ / kg. °C)   |
| <b>D<sub>1</sub></b> :    | Débit de vapeur (kg/h)  |
| <b>D<sub>2</sub></b> :    | Débit d'air (m <sup>3</sup> /h)   |
| <b>D<sub>eff</sub></b> :  | Coefficient de diffusion effectif (m <sup>2</sup> /s)   |
| <b>D<sub>v</sub></b> :    | Diamètre de ventilateur (m)   |
| <b>E<sub>AP</sub></b> :   | Apport énergétique (kWh/jour)   |
| <b>E<sub>cd</sub></b> :   | Besoins énergétiques journaliers de l'aérocondenseur (kWh/Jour)                               |
| <b>E<sub>EL</sub></b> :   | Energie électrique (Wh)   |
| <b>E<sub>j</sub></b> :    | Production journalière moyenne d'électricité (kWh)  |
| <b>E<sub>m</sub></b> :    | Production mensuelle moyenne d'électricité (kWh)  |
| <b>E<sub>PV</sub></b> :   | Quantité d'énergie fournie par les panneaux (kWh/Jour.m <sup>2</sup> )                        |
| <b>F</b> :                | Charge de biomasse (g)  |
| <b>H</b> :                | Hauteur (cm)  |
| <b>H<sub>(90)</sub></b> : | Irradiation solaire à 90° (Wh/m <sup>2</sup> .Jour)   |
| <b>H<sub>1</sub></b> :    | Enthalpie massique de la vapeur saturée (J/kg)  |
| <b>H<sub>2</sub></b> :    | Enthalpie massique du condensat (J/kg)  |
| <b>HE</b> :               | Huile Essentielle   |
| <b>H<sub>hor</sub></b> :  | Irradiation solaire à inclinaison horizontale (Wh/m <sup>2</sup> .Jour)                       |
| <b>H<sub>j</sub></b> :    | Irradiation journalière globale par m <sup>2</sup> du système considéré (kWh/m <sup>2</sup> ) |
| <b>H<sub>m</sub></b> :    | Irradiation mensuelle globale par m <sup>2</sup> du système considéré (kWh/m <sup>2</sup> )   |
| <b>H<sub>opt</sub></b> :  | Irradiation solaire à l'angle d'inclinaison optimal (Wh/m <sup>2</sup> .Jour)                 |
| <b>I<sub>opt</sub></b> :  | Angle d'inclinaison optimal pour chaque mois (°)  |
| <b>K</b> :                | Facteur correctif de DTLM   |
| <b>M<sub>1</sub></b> :    | Débit massique de la vapeur d'eau à condenser (kg/s)  |
| <b>Me</b> :               | Masse d'eau (g)   |
| <b>M<sub>H</sub></b> :    | Masse végétale fraîche (g)  |
| <b>M<sub>V</sub></b> :    | Matière végétale sèche (g)  |
| <b>N</b> :                | Nombre de ventilateurs  |

|                           |  |
|---------------------------|--|
| <b>N'</b> :               | Nombre de ventilateurs par rangée  |
| <b>N<sub>c</sub></b> :    | Nombre de cellules requises  |
| <b>NTU</b> :              | Nombre des unités de transfert   |
| <b>P</b> :                | Puissance (W)  |
| <b>P<sub>B</sub></b> :    | Puissance maximale générée par la combustion de la biomasse (W)  |
| <b>PCS</b> :              | Pouvoir Calorifique Supérieur (kJ / g)   |
| <b>P<sub>d</sub></b> :    | Profondeur (cm)  |
| <b>P<sub>EL</sub></b> :   | Puissance électrique du chauffe-ballon (W)   |
| <b>P<sub>mot</sub></b> :  | Puissance de moteur (W)  |
| <b>P<sub>t</sub></b> :    | Pression statique de ventilateur (bar)   |
| <b>P<sub>T</sub></b> :    | Pression totale (bar)  |
| <b>P<sub>vent</sub></b> : | Puissance de ventilateur (W).  |
| <b>Q</b> :                | Flux thermique total (J)   |
| <b>Q<sub>1</sub></b> :    | Quantité de chaleur absorbée par un corps soumis à une élévation de température sans changement d'état (J) |
| <b>Q<sup>2</sup></b> :    | Quotient pluviothermique d'Emberger  |
| <b>Q<sub>2</sub></b> :    | Quantité de chaleur nécessaire pour la vaporisation de l'eau à 100°C (J)                                   |
| <b>Q<sub>b</sub></b> :    | Quantité maximale de chaleur produite par la combustion de la biomasse                                     |
| <b>Q<sub>c</sub></b> :    | Puissance thermique à échanger pour condenser la vapeur (W)  |
| <b>R</b> :                | Rendement  |
| <b>R<sup>2</sup></b> :    | Coefficient de corrélation   |
| <b>R<sub>∞</sub></b> :    | Rendement maximal en huile essentielle pouvant être obtenu   |
| <b>RI</b> :               | Indice de rétention de Kováts  |
| <b>S<sub>PV</sub></b> :   | Surface du panneau Photovoltaïque (m <sup>2</sup> )  |
| <b>S<sub>v</sub></b> :    | Section transversale (m <sup>2</sup> )   |
| <b>T<sub>0</sub></b> :    | Température initiale de l'eau (°C)   |
| <b>T<sub>1</sub></b> :    | Température d'entrée de fluide à condenser (°C)  |
| <b>T<sub>2</sub></b> :    | Température de sortie de condensat (°C)  |
| <b>T<sub>e</sub></b> :    | Température d'ébullition de l'eau (°C)   |
| <b>T<sub>eau</sub></b> :  | Tension de vapeur de l'eau (bar)   |
| <b>T<sub>H</sub></b> :    | Taux d'humidité  |
| <b>T<sub>HE</sub></b> :   | Tension de vapeur de l'huile essentielle   |

|                           |  |
|---------------------------|--|
| <b>U :</b>                | Coefficient de transmission thermique globale ( $W/m^2 \cdot K$ )          |
| <b>V<sub>2</sub> :</b>    | Débit volumique de l'air ( $m^3/s$ )                                       |
| <b>k :</b>                | Constante cinétique comprenant le coefficient de diffusion effectif        |
| <b>ℓ :</b>                | Largeur (cm)   |
| <b>m' :</b>               | Débit massique de vapeur (kg / h)  |
| <b>m<sub>2</sub> :</b>    | Débit massique de l'air (kg/s)   |
| <b>m<sub>v</sub> :</b>    | Masse de vapeur produite (g)   |
| <b>q<sub>c</sub> :</b>    | Chaleur échangée par une cellule de référence (W)                          |
| <b>ra :</b>               | Résistance de film extérieur ( $h.m^2. ^\circ C/ kcal$ )                   |
| <b>rd :</b>               | Résistance de l'encrassement ( $h.m^2. ^\circ C/ kcal$ )                   |
| <b>ri :</b>               | Résistance de film interne ( $h.m^2. ^\circ C/ kcal$ )                     |
| <b>rm :</b>               | Résistance du métal ( $h.m^2. ^\circ C/ kcal$ )                            |
| <b>t<sub>a1</sub> :</b>   | Température d'entrée de l'air ( $^\circ C$ )                               |
| <b>t<sub>a2</sub> :</b>   | Température de sortie de l'air ( $^\circ C$ )                              |
| <b>t<sub>C</sub> :</b>    | Temps de combustion de la biomasse (min)                                   |
| <b>t<sub>1</sub> :</b>    | Temps nécessaire pour le chauffage de l'eau (min)                          |
| <b>t<sub>2</sub> :</b>    | Temps nécessaire pour la production de 25 mL de vapeur (min)               |
| <b>tr(i) :</b>            | Température de rétention du composé  |
| <b>tr(n) :</b>            | Température de rétention de l'alcane (n) qui précède le composé.           |
| <b>tr(n+1) :</b>          | Température de rétention du l'alcane (n+1).                                |
| <b>v :</b>                | Vitesse d'extraction de l'huile essentielle                                |
| <b>v<sub>f</sub> :</b>    | Vitesse faciale de l'air (m/s)   |
| <b>x :</b>                | Distance selon la direction de diffusion                                   |
| <b>x<sub>1</sub> :</b>    | Titre massique en vapeur d'eau   |
| <b>z :</b>                | Altitude du site (m)   |
| <b>α :</b>                | Angle d'inclinaison de l'avaloir   |
| <b>β :</b>                | Fraction de la puissance utilisée dans le cas d'un chauffage à la biomasse |
| <b>ΔH<sub>VAP</sub> :</b> | Chaleur de vaporisation de l'eau = 2257 kJ/kg                              |
| <b>η :</b>                | Efficacité énergétique du générateur de vapeur biomasse                    |
| <b>η<sub>mot</sub> :</b>  | Rendement de moteur (%)  |
| <b>η<sub>vent</sub> :</b> | Rendement de ventilateur (%)   |
| <b>ρ<sub>air</sub> :</b>  | Masse volumique de l'air ( $kg/m^3$ ).                                     |

## Liste des Tableaux

|  |            |
|--|------------|
| <b>Tableau I-1</b> : Huiles essentielles les plus demandées sur le marché mondial  | <b>9</b>   |
| <b>Tableau I-2</b> : Exemples de plantes utilisées en médecine traditionnelle en Algérie   | <b>12</b>  |
| <b>Tableau I-3</b> : Valeurs des exportations des huiles essentielles et autres  | <b>14</b>  |
| <b>Tableau I-4</b> : Valeurs des importations des huiles essentielles et autres  | <b>17</b>  |
| <b>Tableau I-5</b> : Les principales huiles essentielles importées par pays  | <b>19</b>  |
| <b>Tableau III-1</b> : Conditions d'analyse de la CG/MS  | <b>54</b>  |
| <b>Tableau III-2</b> : Composition de l'huile essentielle de feuilles <i>d'Arbutus unedo L.</i>  | <b>58</b>  |
| <b>Tableau III-3</b> : Composition des huiles essentielles des feuilles <i>d'Arbutus unedo L.</i> d'Algérie et de Turquie                        | <b>59</b>  |
| <b>Tableau III-4</b> : Composition de l'huile essentielle des feuilles d' <i>Erica arborea L.</i>  | <b>64</b>  |
| <b>Tableau IV-1</b> : Paramètres expérimentaux   | <b>68</b>  |
| <b>Tableau IV-2</b> : Dimensions du brûleur à biomasse   | <b>73</b>  |
| <b>Tableau IV-3</b> : Paramètres expérimentaux mesurés   | <b>78</b>  |
| <b>Tableau V-1</b> : Paramètres du modèle du premier ordre   | <b>94</b>  |
| <b>Tableau VI-1</b> : Variables d'entrée et de sortie pour le logiciel de simulation Hysys   | <b>109</b> |
| <b>Tableau VI-2</b> : Coefficient du film et vitesse faciale de l'air  | <b>110</b> |
| <b>Tableau VI-3</b> : Résultats de dimensionnement de l'aérocondenseur   | <b>116</b> |
| <b>Tableau VI-4</b> : Puissance des ventilateurs en fonction de la température   | <b>117</b> |
| <b>Tableau VI-5</b> : L'irradiation solaire mensuelle sur la ville d'Alger   | <b>119</b> |
| <b>Tableau VI-6</b> : L'électricité produite (par surface unitaire du système)   | <b>120</b> |
| <b>Tableau VI-7</b> : La surface du module Photovoltaïque en fonction des besoins énergétiques de l'aérocondenseur (débit de vapeur de 100 kg/h) | <b>122</b> |
| <b>Tableau VI-8</b> : Débits de vapeur et de matière pour chaque Mobilab   | <b>125</b> |
| <b>Tableau VI-9</b> : Résultats de dimensionnement de l'aérocondenseur   | <b>127</b> |
| <b>Tableau VI-10</b> : Chaleur échangée par chaque Mobilab   | <b>127</b> |
| <b>Tableau VI-11</b> : Puissance des ventilateurs en fonction de la température  | <b>128</b> |
| <b>Tableau VI-12</b> : La surface du module Photovoltaïque en fonction des besoins énergétiques de l'aérocondenseur par Mobilab                  | <b>129</b> |
| <b>Tableau VI-13</b> : Quantité d'énergie fournie par les panneaux PV en fonction de la surface disponible du Mobilab                            | <b>130</b> |
| <b>Tableau VI-14</b> : Couverture des besoins énergétiques de chaque Mobilab en fonction de la surface disponible                                | <b>131</b> |

## Liste des Figures

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Figure I-1</b> : Evolution du volume des exportations des huiles essentielles, oléorésines et résinoïdes   | <b>15</b> |
| <b>Figure I-2</b> : Huiles essentielles, oléorésines et résinoïdes exportées  | <b>16</b> |
| <b>Figure I-3</b> : Evolution du volume des importations des huiles essentielles, oléorésines et résinoïdes   | <b>18</b> |
| <b>Figure II-1</b> : Schéma de principe de l'hydrodistillation  | <b>28</b> |
| <b>Figure II-2</b> : Schéma de principe de l'entraînement à la vapeur d'eau   | <b>29</b> |
| <b>Figure II-3</b> : Schéma du principe de l'hydrodiffusion   | <b>30</b> |
| <b>Figure II-4</b> : Schéma de principe d'un pilote VMHD  | <b>32</b> |
| <b>Figure II-5</b> : Schéma de principe de l'hydrodistillation assistée par micro-ondes   | <b>33</b> |
| <b>Figure II-6</b> : Hydrodiffusion assistée par micro-ondes et gravité   | <b>35</b> |
| <b>Figure II-7</b> : Schéma de principe de l'entraînement à la vapeur assisté sous micro-ondes  | <b>36</b> |
| <b>Figure II-8</b> : Schéma du système de distillation solaire  | <b>37</b> |
| <b>Figure II-9</b> : Les différents types de condenseurs  | <b>40</b> |
| <b>Figure II-10</b> : Les différents types d'essenciers   | <b>41</b> |
| <b>Figure III-1</b> : Localisation de la forêt de Bainem  | <b>43</b> |
| <b>Figure III-2</b> : Planche botanique d' <i>Arbutus unedo</i> L.  | <b>45</b> |
| <b>Figure III-3</b> : Planche botanique d' <i>Erica arborea</i> L.  | <b>51</b> |
| <b>Figure III-4</b> : Schéma simplifié du procédé d'extraction des huiles essentielles  | <b>52</b> |
| <b>Figure III-5</b> : Profil chromatographique de l'huile essentielle d'arbousier   | <b>57</b> |
| <b>Figure III-6</b> : Evolution du rendement en huile essentielle des feuilles d' <i>A. unedo</i> L   | <b>60</b> |
| <b>Figure III-7</b> : Vues au photo-microscope de coupes anatomiques (x 170) au niveau des faces inférieure et supérieure de la feuille d'Arbousier | <b>61</b> |
| <b>Figure III-8</b> : Profil chromatographique de l'huile essentielle d' <i>Erica arborea</i> L   | <b>63</b> |
| <b>Figure III-9</b> : Evolution du rendement en huile essentielle des feuilles d' <i>E. arborea</i> L.  | <b>65</b> |
| <b>Figure III-10</b> : Vues au microscope de coupes anatomiques de feuille d' <i>Erica arborea</i> L  | <b>66</b> |
| <b>Figure IV-1</b> : Evolution des pertes de puissance  | <b>70</b> |
| <b>Figure IV-2</b> : Evolution du débit de vapeur en fonction des puissances  | <b>71</b> |
| <b>Figure IV-3</b> : Vue en plan du Brûleur à Biomasse  | <b>73</b> |
| <b>Figure IV-4</b> : Vue en perspective du Brûleur à biomasse   | <b>74</b> |
| <b>Figure IV-5</b> : Dimensionnement du brûleur à Biomasse  | <b>75</b> |
| <b>Figure IV-6</b> : Détermination du PCS moyen de 96 plantes   | <b>81</b> |
| <b>Figure V-1</b> : Cinétiques d'extraction à différents débits de vapeur pour différentes puissance de chauffage                                   | <b>86</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Figure V-2</b> : L'extracteur dans les cas du chauffage électrique et du chauffage à la biomasse                        | <b>86</b>  |
| <b>Figure V-3</b> : Schéma du transfert de matière lors de l'extraction des huiles essentielles par hydrodistillation      | <b>88</b>  |
| <b>Figure V-4</b> : Application du modèle mathématique sur la cinétique d'extraction à différentes puissances de chauffage | <b>94</b>  |
| <b>Figure V-5</b> : Vitesse d'extraction en fonction du temps à différentes puissances de chauffage                        | <b>97</b>  |
| <b>Figure V-6</b> : Consommation énergétique par g de HE produite en fonction du temps                                     | <b>98</b>  |
| <b>Figure V-7</b> : Consommation énergétique en fonction du ratio $R/R_{\infty}$ à différentes puissances de chauffage     | <b>100</b> |
| <b>Figure V-8</b> : Evolution de la consommation d'énergie (%) en fonction de la quantité d'huile produite                 | <b>101</b> |
| <b>Figure VI-1</b> : Présentation d'un faisceau de tubes à ailettes  | <b>104</b> |
| <b>Figure VI-2</b> : La vitesse faciale en fonction du coefficient du film extérieur (air)                                 | <b>111</b> |
| <b>Figure VI-3</b> : Schéma du serpentin   | <b>113</b> |
| <b>Figure VI-4</b> : Disposition des ventilateurs sur deux rangées   | <b>114</b> |
| <b>Figure VI-5</b> : Disposition des ventilateurs sur trois rangées  | <b>115</b> |
| <b>Figure VI-6</b> : Caractéristiques et dimensions des conteneurs   | <b>124</b> |
| <b>Figure VI-7</b> : Caissons mobiles  | <b>126</b> |
| <b>Figure VI.8</b> : Unité d'extraction mobile en fonctionnement   | <b>132</b> |
| <b>Figure VI-9</b> : Configuration de l'unité d'extraction   | <b>133</b> |

## **INTRODUCTION**

Les changements climatiques, la raréfaction des réserves fossiles et l'augmentation des besoins énergétiques au niveau mondial ont suscité des préoccupations d'une importance majeure ces dernières années. Réduire les émissions de CO<sub>2</sub>, améliorer l'efficacité énergétique des procédés industriels et trouver de nouvelles sources d'énergies sont autant de défis que les secteurs industriels, grands consommateurs d'énergie, doivent relever.

L'industrie cosmétique, pharmaceutique, agroalimentaire et de la parfumerie tout comme les autres secteurs économiques, sont amenés à privilégier les pratiques économes en énergie à travers le développement de technologies innovantes et efficaces et à favoriser l'utilisation de sources énergétiques alternatives de sorte qu'elles soient économes et respectueuses de l'environnement.

En effet, ces secteurs de grandes activités économiques et dont les enjeux socio-économiques ne sont pas négligeables, utilisent, d'une façon directe ou indirecte, les procédés d'extraction qui consomment 50 % de l'énergie dans les procédés industriels tous secteurs confondus [1].

Dans le domaine de l'extraction des produits naturels et particulièrement des huiles essentielles, la distillation reste la méthode d'extraction la plus utilisée. Cette méthode traditionnelle, éprouvée et peu coûteuse, est consommatrice d'énergie et d'eau. Afin de permettre le maintien et le développement économique de cette filière, des progrès substantiels ont été accomplis pour améliorer les techniques d'extraction; optimisation des procédés existants, récupération de l'énergie libérée au cours du procédé, assistance aux procédés existants et innovation de procédé [1]. En effet, la recherche a permis le développement de technologies performantes, économes, propres et durables telles que celles utilisant les fluides supercritiques [2], les ultrasons [3], les micro-ondes [4,5], le solaire et la biomasse [6].

C'est dans cette optique de recherche de gain d'énergie en vue d'une amélioration de l'efficacité énergétique, du respect de l'environnement et d'économie d'eau dans les procédés d'extraction en ouvrant la voie à l'intégration des énergies renouvelables, que s'inscrit notre travail de recherche structuré en six chapitres :

Nous avons introduit dans le premier chapitre la filière des huiles essentielles et les impacts et enjeux socioéconomiques liés à son développement. Dans un premier temps, l'accent a été mis sur l'étendue et la diversité des secteurs d'application des huiles essentielles et leur impact sur le marché mondial. Dans un deuxième temps, nous donnons un aperçu sur la production et l'évolution du marché des huiles essentielles en Algérie.

Des généralités sur les huiles essentielles (définition, composition chimique, ...) et les différents procédés d'extraction traditionnels et innovants sont rapportés dans le deuxième chapitre.

L'étude de l'extraction des huiles essentielles de deux espèces du pourtour méditerranéen, *Arbutus unedo* L. et *Erica arborea* L. ont fait l'objet du troisième chapitre. Nous avons exposés aussi dans ce chapitre, les caractéristiques botaniques, la valorisation des deux plantes, les protocoles opératoires des méthodes utilisées et les résultats des études quantitative (cinétique d'extraction) et qualitative menées sur les deux plantes étudiées.

Le quatrième chapitre porte sur le potentiel d'intégration des énergies renouvelables dans le procédé d'extraction des huiles essentielles par hydrodistillation. Cette intégration concerne la production de vapeur par combustion de la biomasse. Un brûleur à biomasse équipé d'un dispositif de production de vapeur a été dimensionné et réalisé. Des expérimentations de combustion pour la production de vapeur ont été effectuées. La vapeur générée a servi à l'extraction de l'huile essentielle d'arbousier. Les résultats obtenus en termes d'évolution du rendement en fonction de la durée d'extraction ont été comparés à ceux obtenus par la méthode classique utilisant un chauffage électrique. Une modélisation des mécanismes de transfert de matière de la phase solide vers la phase

liquide ainsi qu'une modélisation énergétique de l'hydrodistillation sont proposées dans le chapitre 5.

Les résultats d'évaluation des possibilités de substitution de l'eau utilisée généralement comme fluide de refroidissement dans un condenseur, par de l'air fourni par des ventilateurs alimentés à l'énergie solaire photovoltaïque sont présentés dans le chapitre 6. La méthodologie retenue dans ce chapitre est basée uniquement sur une approche numérique en utilisant le logiciel Hysis pour dimensionner et déterminer les caractéristiques et les conditions de fonctionnement de l'aérocondenseur et de ses annexes et le logiciel PV-GIS pour le dimensionnement du système photovoltaïque (alimentation électrique des ventilateurs). Une projection industrielle à travers une étude de faisabilité de conception d'une unité d'extraction mobile, autonome en énergie et en eau, est proposée à la fin de ce chapitre. La proximité, la mobilité, l'autonomie en énergie et en eau, constituent les atouts majeurs de l'unité d'extraction. Cette technologie pourrait permettre de réduire l'impact sur l'environnement et promouvoir le développement rural en produisant des biens et services générateurs d'emplois.

---

---

## **CHAPITRE 1**

### **La filière des huiles essentielles : Impacts et enjeux socioéconomiques**

---

---

Au cours de ces dernières années, le secteur des huiles essentielles a bénéficié d'une croissance rapide, soutenue en particulier par l'étendue et la diversité des secteurs d'application de ces extraits naturels. Les huiles essentielles disposent de nombreux atouts. Elles sont utilisées, pendant de nombreux siècles dans la plupart des civilisations, à des fins religieuses, cosmétiques et médicales. Aujourd'hui, ces extraits de plantes sont encore largement utilisés et ont une importance considérable dans le commerce international.

Le présent chapitre est consacré aux impacts et enjeux socioéconomiques du développement de la filière des huiles essentielles.

## **1. Secteurs d'application des huiles essentielles**

Les huiles essentielles constituent une matière première destinée à divers secteurs d'activités. Leur popularité s'est accrue d'une façon considérable ces dernières années [7]. En effet, la demande industrielle de ces composés à forte valeur ajoutée est bien réelle, et ce grâce à la multiplicité de leurs usages dans de nombreux secteurs industriels et l'engouement des consommateurs pour ces produits de qualité ; pour la société moderne ces produits ne sont plus considérés comme un luxe, mais une exigence et un besoin [8].

### **1.1 Industrie des cosmétiques, savonneries et parfums**

Ce secteur constitue le plus gros consommateur d'huiles essentielles [7,9]. Il représente 60 % de la demande totale en substances naturelles, selon le National Research Development Corporation (NRDC) [10]. Ce secteur se caractérise par une très grande variété de produits, de quantité relativement faible et de prix souvent élevé [11]. Les huiles essentielles sont utilisées comme matière première de base dans la fabrication des parfums et d'autres produits cosmétiques [12,13].

### **1.2 Industrie alimentaire**

Les huiles essentielles sont utilisées pour rehausser le goût des aliments, pour donner une senteur agréable aux biscuits, chocolats, confiseries, boissons gazeuses, conserves, soupes en sachets, viandes, poissons, sauces et condiments [14–17].

Les huiles essentielles sont également utilisées pour la conservation des aliments grâce aux effets antimicrobiens et antioxydants de certains de leurs constituants [18–21]. Ces agents naturels viennent réduire ou remplacer les agents de conservation chimiques ou synthétiques qui présentent des effets néfastes sur la santé [22–25]. En effet, l'utilisation des antioxydants synthétiques tels que l'hydroxytoluène butilé (BHT) ainsi que l'hydroxyanisole butilé (BHA) est suspectée à long terme d'effets mutagènes et cancérigènes [18,26,27].

### **1.3 Industrie pharmaceutique**

L'intérêt accru de la population pour les produits de santé naturels a contribué au développement de l'industrie des huiles essentielles. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), 80% de la population mondiale a recours aux médecines traditionnelles pour satisfaire des besoins en soins de santé primaire [28,29]. Cet intérêt est essentiellement dû au caractère peu onéreux et plus accessible de la médecine traditionnelle par rapport à la médecine conventionnelle importée, plus coûteuse et difficilement accessible. Le marché mondial des médicaments traditionnels à base de plantes est estimé à 60 000 millions de dollars [30].

Les huiles essentielles représentent un outil thérapeutique très efficace [31,32] qui permet d'élargir le champ des traitements médicaux conventionnels. Les huiles essentielles peuvent être utilisées directement comme agents thérapeutiques [33–35], mais aussi comme matières premières pour la synthèse de principes actifs [36,37].

L'utilisation des huiles essentielles dans différentes pathologies (digestive, infectieuse...) fait appel à leurs propriétés: anti-infectieuse, antalgique, anti-inflammatoire, sédative, antimicrobien, antispasmodique et antioxydante [38,35,39,40].

L'activité antioxydante des huiles essentielles est exploitée dans la lutte contre le stress oxydatif qui est défini comme un déséquilibre entre la production excessive de molécules oxydantes et/ou une diminution du taux d'antioxydants dans l'organisme [41]. Le stress oxydatif est impliqué dans certaines maladies dégénératives comme les cancers, la cataracte, les accidents vasculaires cérébraux, la polyarthrite, l'arthrose, les maladies d'Alzheimer et de Parkinson [42,43]. Les huiles essentielles de cannelle, muscade, clou de girofle, basilic, persil, origan et thym possèdent de puissants composés antioxydants

[44]. Le thymol et le carvacrol sont les composés phénoliques les plus actifs [45,46]. L'activité antioxydante des huiles essentielles est également attribuée à d'autres constituants autres que les composés phénoliques comme certains alcools, éthers, cétones, et aldéhydes [44,47–52].

Les huiles essentielles sont également utilisées en milieu clinique pour soigner des maladies inflammatoires [53,54]. Les huiles essentielles bloquent la formation et/ou la sécrétion des médiateurs de l'inflammation comme l'histamine, les cytokines pro-inflammatoires, les prostaglandines, l'oxyde d'azote et les radicaux libres produits par les neutrophiles [55].

Les huiles essentielles présentent également, des propriétés cytotoxiques. Elles sont utilisées dans le traitement préventif de certains types de cancers. L'huile essentielle, isolée des graines de *Nigella sativa* L., démontre une activité cytotoxique *in vitro* contre différentes lignées cellulaires tumorales. *In vivo*, elle limite la prolifération de métastases hépatiques et retarde la mort des souris ayant développé une tumeur [56,57]. L'huile essentielle de *Melissa officinalis* s'est, quant à elle, révélée efficace contre des cellules de lignées cancéreuses humaines, incluant les cellules leucémiques [58].

Les huiles essentielles sont considérées comme agents antimicrobiens à large spectre [59]. L'usage excessif des médicaments de synthèse et la résistance des bactéries aux antibiotiques [38,60], ont conduit à reconsidérer favorablement l'utilisation des huiles essentielles en pratiques médicinales. Les huiles essentielles d'agrumes, de lavande, de menthe, de genévrier, de l'arbre à thé, de thym et d'eucalyptus sont actives sur le *Staphylococcus aureus* résistant à la methicilline [61,62] et sur l'*Enterococcus faecium* résistant à la vancomycine [63]. Les huiles essentielles, isolées de deux espèces de thym de Corée, *Thymus magnus* et *Thymus quinquecostatus*, sont également capables d'inhiber la croissance de *Streptococcus pneumoniae* résistant à la pénicilline [64]. Les huiles extraites des achillées, *Achillea fragrantissima* [65], *A. setacea*, *A. teretifolia* [66] et *A. millefolium* [67], se sont révélées efficaces contre la levure pathogène *Candida albicans* résistant à l'azolé [55,59].

### **1.4 Autres domaines d'application**

Les huiles essentielles présentent des activités insecticides [68–73]. Elles sont aussi utilisées dans la lutte biologique contre les ravageurs. En effet, ces biopesticides présentent un réel avantage par rapport aux produits phytosanitaires qui comportent des risques pour la santé humaine et pour l'environnement. Les biopesticides à partir des huiles essentielles sont caractérisés par leur faible rémanence, leur faible toxicité pour l'homme et par leur mode d'action sur les ravageurs [9,74–77]. L'action des huiles essentielles sur les insectes et acariens affecte la croissance, la mue, la fécondité et le développement.

Les huiles essentielles entrent dans la composition des produits d'entretien et de dégraissage. Le d-limonène employé depuis cinquante ans comme arôme, est de plus en plus utilisé ces dernières années comme nettoyant et dégraissant. On le retrouve dans l'entretien mécanique, la fabrication de produits métalliques, le nettoyage du fuselage des avions et le nettoyage des modules de circuits imprimés [78].

## **2. Marché mondial des huiles essentielles**

Ces dernières années, le marché mondial des huiles essentielles est en nette évolution. Les principaux leaders de ce marché sont sans cesse à l'affût de nouvelles fragrances et molécules afin de diversifier leur gamme. Quelque 3000 huiles essentielles sont connues, dont environ 300 sont d'importance commerciale [79].

Les quantités d'huiles essentielles produites dans le monde sont très variables. La production annuelle de certaines huiles essentielles dépasse 35.000 tonnes alors que celle des autres peut atteindre quelques kilogrammes [80].

En 2008, La production mondiale des huiles essentielles est dominée par le Brésil et l'Inde avec des productions respectives de 28,6 % et 25,6 %. Suivent ensuite pour un tiers du marché les Etats-Unis, la Chine et l'Argentine avec des productions atteignant respectivement 16,8 %, 9,0 % et 4,9 %. Neuf pays avec des productions internes entre 0,1 et 2 % (France : 1 %) pèsent pour 10 % dans le marché mondial.

Enfin, les derniers 10 % se répartissent entre les autres pays du monde avec une production inférieure à 0,1 % [80].

## **2.1 Les exportations**

L'analyse des tendances du marché international indique que les exportations mondiales des huiles essentielles pour les années 1998-2002 ont dépassées un milliard de dollars annuellement. Les Etats-Unis est le plus grand fournisseur des huiles essentielles. En 2002, les exportations ont atteint 312 millions de dollars, soit une augmentation de 5 % par rapport à l'année 2001. Le deuxième plus grand exportateur est la France, qui exporte chaque année environ 160 millions de dollars. Ces exportations ont augmentées de 7 % entre 2002 et 2001. Les principales destinations des exportations sont les Etats-Unis, l'Allemagne, la Suisse, le Royaume-Uni et le Japon. Le Royaume-Uni est le troisième plus grand exportateur d'huiles essentielles. La valeur des exportations a atteint 88 millions de dollars en 2002, soit une baisse de 8% par rapport à 2001 [81].

Les données de la base de données COMTRADE montrent que l'Egypte est le principal pays exportateur d'Afrique de plantes pharmaceutiques vers le marché mondial. Entre 1991 et 2003, elle a exporté en moyenne 11 800 tonnes par an pour une valeur de 13,5 millions USD. En 2007, les exportations annuelles ont atteint quelques 22 572 tonnes pour une valeur de 32 millions USD. Un deuxième pays africain, le Maroc, a exporté 12 133 tonnes pour une valeur de 25 millions USD de plantes médicinales et ses exportations sont montées de 5 510 tonnes en 1993 jusqu'à 12 133 tonnes en 2007.

## **2.2 Les importations**

Le flux des importations mondiales d'huiles essentielles de 1998 à 2001 est resté stable autour d'une valeur de 1.300 millions de dollars. Les cinq premiers pays importateurs d'huiles essentielles représentent 62% des importations mondiales. On retrouve les Etats-Unis, la France, la Grande-Bretagne, le Japon et l'Allemagne [81].

Selon la base de données COMTRADE [82] des Nations Unies, les importations mondiales d'huiles essentielles se situaient à 2 milliards USD en 2005 et les dix principaux marchés d'importation étaient les États-Unis d'Amérique ( 391 M USD), la France (199 M USD), le Royaume-Uni (175 M USD), le Japon (152 M USD),

l'Allemagne (117 M USD), la Suisse (103 M USD), l'Irlande (75 M USD), la Chine (65 M USD), le Singapour (61M USD) et enfin l'Espagne (61M USD).

Les prix des huiles essentielles atteignent parfois des niveaux très élevés qui dépassent les 50.000 USD le litre et notamment pour les essences des plantes très prisées sur le marché international. Le tableau I-1 [80,83] donne, selon les données de 2008, les huiles essentielles les plus demandées sur le marché international. Pour certaines huiles, la demande dépasse largement l'offre.

**Tableau I-1 : Les huiles essentielles les plus demandées sur la marché mondial**

| <b>Huile Essentielle</b>      | <b>Volume (Tonne)</b> | <b>Pays producteurs</b>              |
|-------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| Orange                        | 51000                 | USA, Brésil, Argentine               |
| Menthe des champs             | 32000                 | Inde, la Chine, l'Argentine          |
| Eucalyptus type cinéole       | 4000                  | Inde, la Chine, l'Argentine          |
| Citronnelle                   | 1800                  | Chine, au Sri Lanka                  |
| Menthe poivrée                | 2367                  | Inde, les USA, la Chine              |
| Citron                        | 9200                  | Argentine, l'Italie, l'Espagne       |
| Eucalyptus (type citronellal) | 1000                  | Chine, le Brésil, l'Inde, le Vietnam |
| Feuille de clou de girofle    | 1800                  | Indonésie, à Madagascar              |
| Verveine exotique             | 1200                  | Chine                                |
| Menthe verte                  | 1800                  | Etats-Unis, la Chine                 |
| Bois de cèdre (Chine)         | 1650                  | Etats-Unis, la Chine                 |
| Lavandin                      | 1100                  | France                               |
| Patchouli                     | 1200                  | Indonésie, en Inde                   |

### **3. La filière des huiles essentielles en Algérie**

En Algérie, Les données officielles sur l'organisation de la filière des huiles essentielles ne sont pas disponibles. Les seules données dont nous disposons concernent les inventaires floristiques de la Direction Générale des Forêts (DGF) et les statistiques des importations et exportations du commerce extérieur des produits agricoles. L'état des lieux de cette filière sera apprécié d'une façon générale, à partir des données relatives aux plantes aromatiques et médicinales.

#### **3.1 Etat des lieux**

L'Algérie de part sa situation géographique, possède une flore riche et variée. Cette richesse s'explique par l'étendue de sa surface constituée par des écosystèmes de types méditerranéen, steppique et saharien. 3139 espèces sont décrites par Quezel et Santa [84] dans la nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales. Zeraia [85] dénombre 168 espèces endémiques spécifiques de l'Algérie. Hormis ces documents, il existe très peu de travaux sur la distribution, l'importance et la productivité des plantes médicinales en Algérie.

L'Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie (INRAA) dans son rapport national sur l'état des ressources phytogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture en 2006, signale plus de 626 espèces, sous espèces et variétés médicinales [86]. Selon le même rapport sur les 1 600 espèces spontanées utiles et cultivées, l'Algérie n'en utilise que 1%.

Concrètement, la première grande action concernant les plantes médicinales fut la création en 1941 du comité de contrôle de la production, de la répartition et de la vente des plantes médicinales et aromatiques en Algérie [87]. L'un des objectifs majeur de ce comité était de combler l'importante pénurie de drogues officielles et limiter ainsi les importations. En 1942, un répertoire de plantes aromatiques et médicinales a été publié. Dans cet ouvrage 98 espèces végétales sont décrites (nom latin, nom vernaculaire, odeur, saveur et usages) [88].

Selon le rapport de l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN) et de l'Agence Nationale pour la Conservation de la Nature (ANN) sur le Programme de la Biodiversité en Afrique du Nord [87], les chances de réussite d'une industrie de

fabrication de médicaments à partir de plantes en Algérie existent et ceci grâce à l'abondance des plantes médicinales, à la diversité climatique, à l'existence d'une main d'œuvre et à l'expérience dans les domaines agronomique et artisanal.

Depuis 2003, la politique agricole de l'Algérie encourage la culture et la valorisation des plantes médicinales et aromatiques par la mise en œuvre de projets de développement rural. En effet dans la phase III du programme sur la Biodiversité en Afrique du Nord [89] des projets pilotes pour la culture de plantes médicinales ont été mis en place dans trois fermes dirigées par des femmes. Chaque bénéficiaire s'est engagée à cultiver des plantes médicinales sur 800 m<sup>2</sup> de sa principale terre arable. La récolte entière est vendue aux herboristes locaux. Cette action a permis le développement rural et l'amélioration des conditions de vie.

En dépit de cette richesse floristique, la filière des plantes aromatiques et médicinales et de ses dérivés est peu développée en Algérie. Aucune étude estimative n'a pu mettre en évidence quantitativement et économiquement leurs utilisations dans la pharmacopée [90]. Elles sont traditionnellement utilisées par les populations locales pour l'aromatisation des aliments, les arts culinaires et les vertus médicinales. Cette utilisation traditionnelle résulte de connaissances pratiques ancestrales accumulées dans le temps, puis transmises de génération en génération.

Selon l'inventaire de la Direction Générale des Forêts [91], on trouve une liste non exhaustive de 420 plantes qui sont utilisées en médecine traditionnelle sur l'ensemble du territoire national. Dans le tableau I-2, sont donnés quelques exemples de plantes utilisées dans la médecine traditionnelle.

**Tableau I-2 : Exemples de plantes utilisées en médecine traditionnelle en Algérie [91]**

| Wilaya      | Exemples d'espèces                                  | Usage locale   |
|-------------|---|--|
| Alger       | <i>Melissa officinalis</i> L. ( <b>Mélilèsse</b> )  | troubles digestifs, crampes d'estomac d'origine nerveuse, vomissement et insomnie        |
|             | <i>Geranium robertianum</i> L. ( <b>R'guemaya</b> ) | action collutoire, vulnéraire, tonique diurétique, antihémorragique et résolutive        |
| Tamanrasset | <i>Euphorbia granulata</i> forsk ( <b>Tellakh</b> ) | morsures des serpents et scorpions   |
|             | <i>Artemisia judaica</i> L ( <b>Taharadjelé</b> )   | troubles digestifs et contre la grippe anti diarrhéique et vermifuge                     |
|             | <i>Fagonia bruguieri</i> DC. ( <b>Afassur</b> )     | jaunisse et les troubles du foie.  |
| Batna       | <i>Erica arborea</i> L. ( <b>Bouhadad</b> )         | diurétiques et antiseptique  |
|             | <i>Cynodon dactylon</i> L. ( <b>Afar</b> )          | diurétique, dépurative du sang et cholagogue   |
|             | <i>Tamarix gallica</i> L. ( <b>Tarfa</b> )          | astringent, anti diarrhéique, diurétique, bon pour l'insuffisance hépatique.             |
| Tindouf     | <i>Zizyphus lotus</i> L. ( <b>Sedra</b> )           | adouçissante, gorge et broncho pulmonaire, anti-inflammatoire, analgésique.              |
|             | <i>Calotropis procero</i> ( <b>Toudja</b> )         | antibiotique (carries dentaires et dermatoses) et antalgique                             |
|             | <i>Acacia raddiana</i> Savi. ( <b>Talh, Abser</b> ) | vermifuge, antifongique, anti-œdémateux  |
| Médéa       | <i>Pistacia lentiscus</i> L ( <b>Dhrou</b> )        | antiseptique, astringents, expectorant, détersif, diurétique, hémostatique, stimulant    |
|             | <i>Arbutus unedo</i> L. ( <b>Lendj</b> )            | anti-diarrhéique, anti-inflammatoire, antiseptique, urinaires, astringentes, dépurative. |
|             | <i>Erica arborea</i> L. ( <b>khelnedj</b> )         | astringent, diurétique, antiseptique, uro-génitale, dépuratif.                           |

### **3.2 Commercialisation des huiles essentielles en Algérie**

En Algérie, la commercialisation des plantes aromatiques et médicinales se fait à l'état brut, ou à l'état conditionné en huile essentielle, oléorésines et résinoïdes. Les données présentées dans ce travail de thèse, reposent sur les statistiques du commerce extérieur des produits agricoles et les statistiques du Centre National de l'Informatique et des Statistiques (CNIS) de la Direction Générale des Douanes réalisés sur la base des déclarations en douane et des données statistiques des échanges extérieurs.

Les données du commerce extérieur agricole concernent les huiles essentielles, oléorésines et résinoïdes regroupés en un seul chapitre. Quant aux données issues des douanes algériennes, elles regroupent en un seul chapitre, le 33 dans le code des douanes, les huiles essentielles et résinoïdes, les produits de parfumerie ou de toilette préparés et les préparations cosmétiques. Ceci explique la différence enregistrée entre les valeurs commerciales des deux sources de données. Ainsi, pour l'analyse des résultats, nous prenons en considération les données du commerce extérieur agricole.

Selon ces statistiques [92–99], l'Algérie est restée en marge de l'évolution mondiale du secteur des huiles essentielles, oléorésines et résinoïdes. Les échanges commerciaux (exportations et importations) sont nettement dominés par les importations.

#### **3.2.1 Les exportations**

L'analyse des statistiques du commerce extérieur agricole et des douanes (tableau I-3 et figures I-1) des huiles essentielles et autres, montre que les exportations dans cette catégorie de produits restent insignifiantes comme c'est le cas en 2001 et 2005.

Pour l'année 2002, les activités de transformation et de valorisation des plantes aromatiques et médicinales ont permis une exportation de près de 1137 kg d'huiles essentielles et d'extraits divers d'une valeur de 31255 USD.

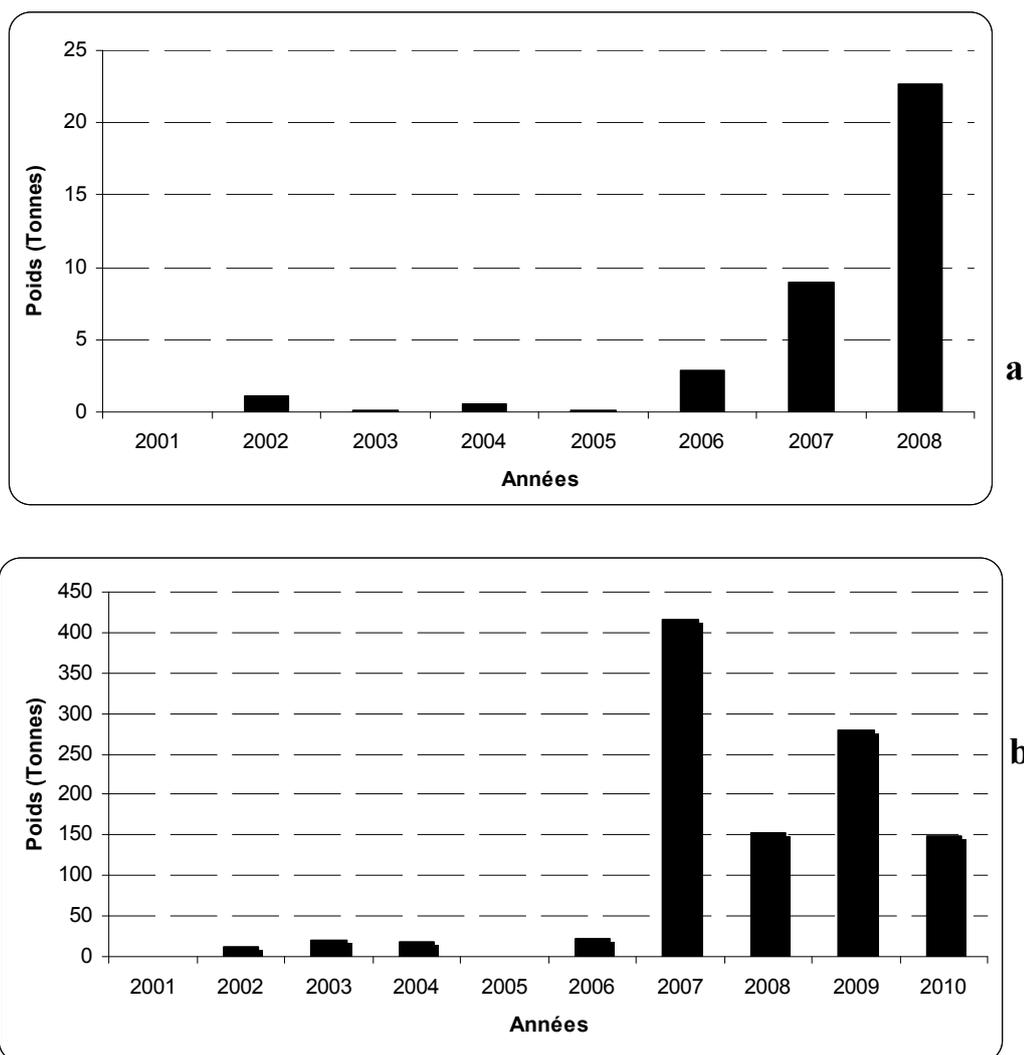
De 2003 à 2005 les exportations subissent une tendance à la baisse avec respectivement des volumes de 68.5 à 100 kg. Ces volumes correspondent à des valeurs de 1498 USD pour l'année 2003 et à 1000 USD pour l'année 2005.

La reprise des exportations s'est précisée à partir de 2006 avec 2823 kg et d'une valeur de 7644 USD. Le pic des exportations est enregistré en 2008 avec un volume de 22690 kg et une valeur commerciale de 998261 USD.

**Tableau I-3: Valeurs des exportations des huiles essentielles et autres**

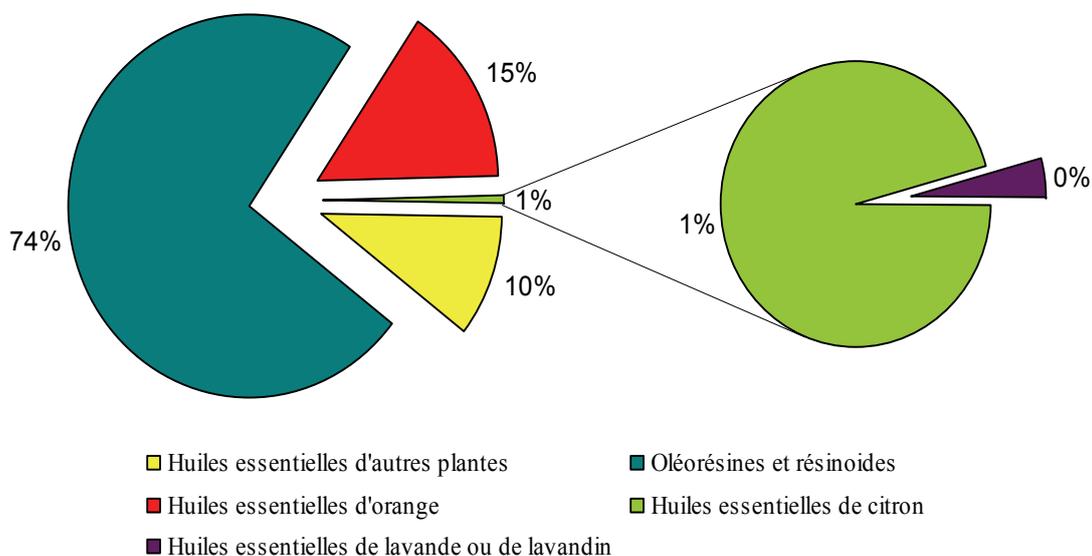
| Année | Unité=1000 USD <sup>1</sup> | Unité=1000 USD <sup>2</sup> |
|-------|-----------------------------|-----------------------------|
| 2001  | 0                           | 5,507                       |
| 2002  | 31,255                      | 84,261                      |
| 2003  | 1,498                       | 569,645                     |
| 2004  | 0,181                       | 480,614                     |
| 2005  | 1                           | 0                           |
| 2006  | 7,644                       | 168,442                     |
| 2007  | 41                          | 497,95                      |
| 2008  | 998,261                     | 1827,229                    |
| 2009  | -                           | 1178,948                    |
| 2010  | -                           | 1039,51                     |

Sources : <sup>1</sup> statistiques du commerce extérieur agricole  
<sup>2</sup> statistiques des douanes algériennes



**Figure I-1** : évolution du volume des exportations des huiles essentielles  
**(a)** statistiques du commerce extérieur agricole et **(b)** statistiques des douanes algériennes

Les produits exportés comme les huiles essentielles d’orange, de citron de lavande ou de lavandin et d’autres plantes, participent à hauteur de 26 % alors que les oléorésines d’extraction et les résinoïdes représentent 74 %. De l’analyse des mouvements commerciaux entre les différentes huiles essentielles exportées (figure I-2), on constate que l’orange assure à elle seule la moitié des exportations. Les pays destinataires de ces produits sont le Canada, la France et la Belgique.



**Figure I-2** : huiles essentielles, oléorésines et résinoïdes exportées

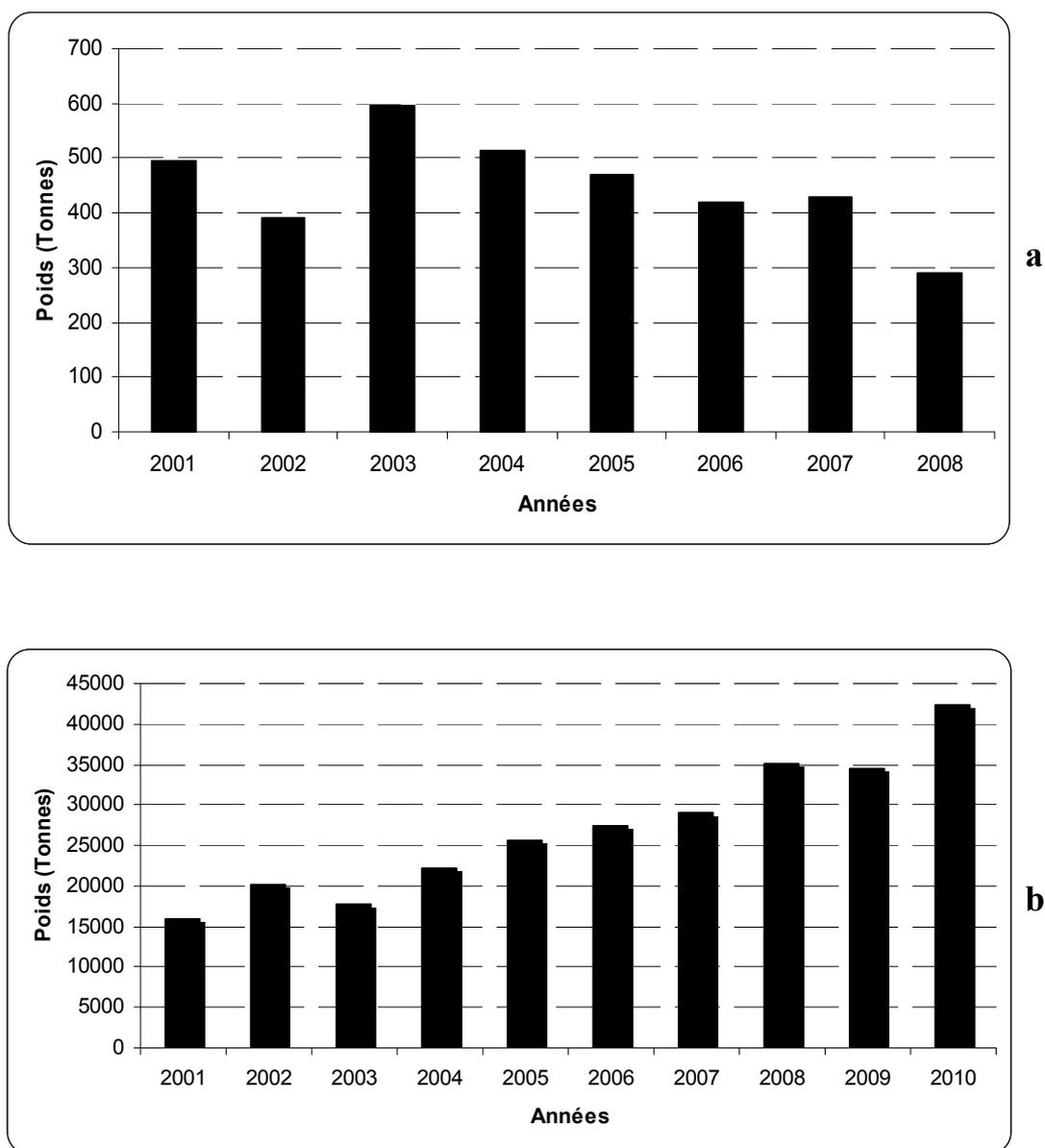
### 3.2.2 Les importations

L'analyse des tendances des importations de la période 2001 à 2010 (tableau I-4 et figure I-3), laisse apparaître des alternances de hausse et de baisse sans tendance précise, du volume des importations des huiles essentielles, oléorésines et résinoïdes. De 2001 à 2004, les importations sont respectivement de 493 tonnes et 514 tonnes pour des valeurs de 3659 mille USD pour l'année 2001 et de 6282 mille USD pour l'année 2004. Les quantités importées accusent une baisse pour ressortir à 289 tonnes d'une valeur de 2710 mille USD en 2008 contre 470 tonnes et une valeur de 4846 mille USD en 2005. Ainsi, le développement de la production locale, apprécié par l'évolution des exportations, a permis de diminuer les importations

**Tableau I-4: Valeurs des importations des huiles essentielles et autres**

| Année | Unité=1000 USD <sup>1</sup> | U=1000 USD <sup>2</sup> |
|-------|-----------------------------|-------------------------|
| 2001  | 3659,347                    | 30958                   |
| 2002  | 4615,433                    | 37706                   |
| 2003  | 5389,979                    | 42810                   |
| 2004  | 6282,839                    | 57213                   |
| 2005  | 4846                        | 61579                   |
| 2006  | 3101,696                    | 63974                   |
| 2007  | 3330                        | 74199                   |
| 2008  | 2710,573                    | 94702                   |
| 2009  | -                           | 98326                   |
| 2010  | -                           | 123218                  |

Sources : <sup>1</sup> statistiques du commerce extérieur agricole  
<sup>2</sup> statistiques des douanes algériennes



**Figure I-3** : évolution du volume des importations des huiles essentielles (a) statistiques du commerce extérieur agricole et (b) statistiques des douanes algériennes

Dans le tableau I-5, sont listées les principales huiles essentielles importées par l'Algérie afin de satisfaire à la demande locale en cette catégorie de produits.

**Tableau I-5: Les principales huiles essentielles importées par pays**

|                     |  |
|---------------------|--|
| Bergamote           | France, Espagne, Belgique, Union européenne  |
| Orange              | Allemagne, Brésil Espagne, Etats-Unis d'Amérique, France et l'Italie   |
| Citron              | Allemagne, Argentine, Belgique, Brésil Espagne, France et l'Italie   |
| Lime ou limette     | France, Espagne  |
| Autres agrumes      | Belgique, Brésil, Egypte, Emirats arabes unis, Espagne, France, Grande-Bretagne, Italie, Maroc, Mexique  |
| Géranium            | France, Allemagne, Suisse  |
| Jasmin              | Allemagne, France, Espagne, Grande-Bretagne, Emirats arabes unis, Turquie, Union européenne  |
| Lavande et lavandin | France, Espagne, Union européenne, Tunisie   |
| Menthe poivrée      | France, Inde et l'Italie   |
| Autres menthes      | France, Inde et l'Italie   |
| Vétiver             | Espagne, Italie  |
| Autres plantes      | Afrique du sud, Belgique, Chine, Egypte, Emirats arabes unis, Espagne, France, Inde, Grande-Bretagne, Italie, Maroc, Pays-Bas, Corée, Union européenne, Allemagne, A. Saoudite, Liban, Turquie, Suisse, Jordanie, Tunisie, Indonésie |
| Résinoïdes          | Allemagne, France  |
| Oléorésines         | Chine, Emirats arabes unis. Iran, Belgique, Espagne, France, Hongrie, Lituanie, Pays-Bas, Allemagne, Grande-Bretagne, Union européenne   |

## **Conclusion**

Le secteur de production des huiles essentielles connaît ces dernières années, un essor rapide. Cette évolution est due essentiellement à la forte demande mondiale pour les produits naturels, au nombre croissant d'utilisateurs et enfin à la diversité des domaines de valorisation.

L'exploitation industrielle durable de cette ressource renouvelable, en utilisant des technologies appropriées, ne peut que contribuer grandement à la croissance socio-économique du pays et plus particulièrement des régions rurales. La cueillette des plantes aromatiques et médicinales pour en extraire, après distillation, des huiles essentielles se fait par les populations rurales. Ce sont des bergers, des villageois, des retraités et, souvent, des femmes qui trouvent là, dans la plupart des cas, un revenu supplémentaire.

En Algérie et tenant compte des importations croissantes d'huiles essentielles et d'extraits de plante il apparaît que la filière des huiles essentielles est peu développée malgré les fortes potentialités. Pour promouvoir ce secteur émergent et profiter des opportunités offertes, il est important d'engager cette filière dans la voie d'un développement durable qui veut concilier progrès économique, technologique, social et préservation de l'environnement.

---

---

## **CHAPITRE 2**

### **Les huiles essentielles : Définition, composition et procédés d'extraction**

---

---

Ce chapitre constitue une synthèse bibliographique. Il est consacré aux huiles essentielles (définition, composition chimique, ...) ainsi qu'aux différents procédés d'extraction traditionnels et innovants.

## **1. Les huiles essentielles**

### **1.1 Histoire**

L'extraction des huiles essentielles date de l'antiquité. La connaissance de leurs propriétés thérapeutiques remonte à la civilisation chinoise et égyptienne. Ces substances étaient utilisées à des fins religieuses, médicales ou alimentaires dans l'Égypte ancienne.

Dans la Grèce antique, Hippocrate, le père de la médecine, recommandait de faire quotidiennement des bains et des massages aromatiques pour vivre longtemps et conserver une bonne santé. Dioscoride, véritable précurseur des chercheurs des facultés modernes, pharmacographe avant l'heure, décrit avec précision l'usage médicinal de 519 espèces de plantes dans son ouvrage (*De Materia medica*) [100].

Les romains utilisaient les aromates sous forme de graisse aromatique ou huile parfumée. Ils connaissaient les propriétés antibactériennes et antiseptiques des plantes aromatiques qu'ils cultivaient. Des fumigations de plantes à essences comme le romarin, le laurier, la sauge, la cannelle et le girofle furent pratiquées lors de la grande épidémie de peste.

Les arabes, grands utilisateurs d'alchimie et de médecine à partir de sources naturelles, ont inventé la méthode de distillation à la vapeur. Vers l'an 1000, le grand savant Ibn Sina développa et perfectionna le processus de distillation en mettant au point le serpentin pour la réfrigération du produit distillé. Des indications thérapeutiques de plantes sont relatées dans son ouvrage le « canon de la médecine » [101].

En 1928 le chimiste français René Maurice Gattefossé créa le terme « aromathérapie ». Il établit les règles précises et scientifiques d'une aromathérapie moderne et responsable et consacra sa vie à étudier les propriétés antibactériennes des huiles essentielles [101].

Aujourd'hui encore nous assistons à un regain d'intérêt à l'utilisation des huiles essentielles. Leur popularité s'est accrue d'une façon considérable ces dernières années [102] et leurs actions naturelles et bénéfiques sont à nouveau mises en valeur.

### **1.2 Définition des huiles essentielles**

Les huiles essentielles sont des produits du métabolisme secondaire [103] qui permettent à la plante de se défendre face aux facteurs de stress biotique et abiotique. Les huiles essentielles sont considérées comme des signaux chimiques à travers lesquels la plante communique avec son environnement (plantes et autres organismes).

Les huiles essentielles sont des substances chimiques volatiles [104,105], liquide à température ambiante. Elles sont très peu solubles dans l'eau et sont solubles dans les lipides et dans les solvants organiques. Les huiles essentielles sont extraites de diverses parties des végétaux (fleurs, feuilles, écorces, bois, racines, rhizomes, fruits ou graines).

La teneur des plantes en huiles essentielles est faible ; elle est de l'ordre de 1 à 3 % à l'exception du clou de Girofle (14 à 19 %), du Macis (10 à 13 %), de la noix de Muscade (8 à 9 %) et de la Cardamome (4 à 10 %) [106,107].

### **1.3 Localisation des huiles essentielles dans la plante**

Les huiles essentielles sont synthétisées dans le cytoplasme des cellules végétales spécialisées. Elles s'accumulent en général dans des structures glandulaires variables suivant les familles botaniques. Elles sont localisées en surface sous la cuticule pour une sécrétion exogène ou en profondeur dans les tissus parenchymateux pour une sécrétion endogène [108].

Ces structures peuvent être des cellules sécrétrices (Lauraceae, Magnoliaceae Zingiberaceae), des poils sécréteurs (Labieae et Geraniaceae), des poches sécrétrices (Myrtaceae et Rutaceae) ou des canaux sécréteurs (Ombeliffereae et Conifereae) [105,109].

### 1.4 Composition biochimique des huiles essentielles

Les huiles essentielles sont des mélanges complexes de molécules organiques volatiles [104,110]. Elles appartiennent à deux groupes de produits caractérisés par des origines biogénétiques distinctes ; le groupe des terpénoïdes et le groupe aromatique et aliphatique (alcane, alcène, alcénol, phénol, etc.) [111].

Les terpènes constituent une famille de composés largement répandus dans le règne végétal [112,113]. Leur structure est composée d'unité isoprénique à 5 atomes de carbone (méthyl-2-butadiène). Ils sont classés par le nombre de chaînons isopréniques qui les composent [112]. On distingue les monoterpènes (C<sub>10</sub>), les sesquiterpènes (C<sub>15</sub>), les diterpènes (C<sub>20</sub>). Les composés terpénoïdes peuvent être des hydrocarbures de formule brute (C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>)<sub>n</sub> ou bien des composés diversement fonctionnalisés tels que des alcools, cétones, phénols, acides, aldéhydes, éthers, esters. Les huiles essentielles sont constituées en majorité de monoterpènes [112,114].

### 1.5 Effets biologiques des huiles essentielles

Les huiles essentielles possèdent de nombreuses propriétés thérapeutiques et ont des effets biologiques sur les cellules de l'organisme [108,115] :

- effets antiseptiques, anti-infectieux, antiviraux, voire antibiotiques,
- effets sur les réponses inflammatoire et immunologique (anti-inflammatoires, antihistaminiques),
- effets sur l'activité neurologique (analgésiques, calmants, anxiolytiques, sédatifs, insomnies, antispasmodiques,...),
- effets sur l'activité digestive (diurétiques stimulant l'excrétion urinaire, laxatifs stimulant le péristaltisme, bloquants de l'absorption des nutriments,...)
- effets sur le système cardiovasculaire (antihypertenseurs, vasopresseurs,...)
- effets sur le métabolisme (antipyrétiques)
- effets autres: antifongiques, photosensibilisation....

## 1.6 Les chémotypes

Au sein d'une même espèce de plante, la composition de l'huile essentielle des divers individus peut présenter des profils chimiques ou chémotypes différents. C'est une forme de classification chimique, biologique et botanique désignant la molécule majoritairement présente dans une huile essentielle [116]. Ces variations chimiques sont essentiellement en relation avec les différents facteurs externes auxquels la plante est soumise lors de sa croissance (altitude, humidité, ensoleillement, nature du sol, etc.).

Les huiles essentielles à chémotypes différents présenteront non seulement des activités différentes mais aussi des toxicités très variables. On parle d'une huile essentielle chémotypée "H.E.C.T». Le thym; *Thymus vulgaris* est l'exemple classique présentant 08 chémotypes à Thymol, à Thuyanol (Thujanol), à Carvacrol, à Géraniol, à Linalol, à Terpinéol, à Cinéole et à Paracymène [116].

## 2. Extraction des huiles essentielles

Les méthodes d'extractions traditionnelles des huiles essentielles sont d'une grande importance et sont encore utilisées dans de nombreuses régions du globe. L'hydrodistillation, l'entraînement à la vapeur d'eau, l'hydrodiffusion et l'expression à froid sont les méthodes traditionnelles les plus utilisées.

### 2.1 La distillation à la vapeur et ses variantes

Connue depuis la plus haute Antiquité, transmise par les Arabes et perfectionnée par les Grassois, la distillation à la vapeur est à la base des méthodes couramment utilisées pour l'extraction des huiles essentielles [117]. L'hydrodistillation et ses variantes reposent sur le même principe : entraînement des constituants volatils du matériel végétal par la vapeur d'eau. La différence entre ces procédés réside dans le degré de contact entre l'eau liquide et le matériel végétal [118].

#### 2.1.1 Mécanisme de la distillation

Lors de la distillation des huiles essentielles, plusieurs phénomènes sont à la base d'échanges de matière entre les phases solide, liquide et vapeur, d'où l'influence d'un

grand nombre de paramètres sur la cinétique d'extraction et le rendement de la production. L'extraction se fait en deux étapes [118,119]:

- La diffusion de l'huile essentielle de l'intérieur des tissus vers la surface du matériel végétal (l'hydrodiffusion)
- L'évaporation et entraînement à la vapeur d'eau.

Durant la distillation, l'eau bouillante pénètre dans les cellules végétales et solubilise une partie de l'essence des glandes sécrétrices. La solution aqueuse chargée de composés terpéniques, diffuserait ensuite à travers une épaisseur de tissu, plus ou moins dense, selon l'organe et la localisation des cellules sécrétrices, vers la surface extérieure où l'huile essentielle serait vaporisée et entraînée sous forme d'azéotrope [120].

Dans le cas où ces structures sont superficielles, la membrane externe ou la cuticule qui constituent les seules barrières à la libération de l'huile essentielle sont vite rompues à l'ébullition. Les composés volatils sont aussitôt évaporés. Lorsque les essences sont sous-cutanées, elles doivent d'abord diffuser à travers l'épaisseur du tissu végétal avant d'entrer en contact avec l'eau ou sa vapeur. Alors elles sont évaporées comme dans le cas des sécrétions superficielles [120].

En 1910, Von Rechenberg [120] entreprend une étude fondamentale sur la distillation des huiles essentielles. Il considère que la vitesse relative de la distillation des différents composés aromatiques, dépend davantage de leurs solubilités dans l'eau que de leurs points d'ébullition. L'ordre de sortie des composés serait dicté par leur polarité et non par leur volatilité. Par ailleurs il spécifie que ce processus n'a lieu qu'avec les organes de plantes intactes, n'ayant pas subi d'endommagement (concassage, broyage), sinon l'ordre de distillation des composés s'effectue selon leur volatilité jusqu'à ce que la fraction d'essence directement exposée à la vapeur soit épuisée. Ce type de transport contrôlé par la polarité des constituants correspond au mécanisme d'hydrodiffusion.

Après l'hydrodiffusion, l'essence est transférée de la surface de la particule végétale dans le bain aqueux au sein duquel elle se disperse. L'influence des facteurs impliqués dans l'entraînement des molécules organiques dépend de l'équilibre des phases liquide-vapeur qui est régi par deux lois physiques :

- La loi de Dalton qui montre que la pression du mélange de vapeur est égale à la somme des tensions de vapeurs de divers constituants

$$P_T = T_{HE} + T_{eau} \quad (\text{II-1})$$

- La loi de Raoult qui indique que le rapport des quantités des entités distillées simultanément est fonction de la tension et des densités de vapeurs à la température de distillation choisie.

$$\frac{\text{Mole}_{HE}}{\text{Mole}_{eau}} = \frac{T_{HE}}{T_{eau}} \quad (\text{II-2})$$

HE et eau désignent respectivement l'huile essentielle et l'eau

$P_T$  : Pression totale

$T_{eau}$  : Tension de vapeur de l'eau

$T_{HE}$  : Tension de vapeur de l'huile essentielle

La température d'ébullition d'un mélange est atteinte lorsque la somme des tensions de vapeur de chacun des constituants est égale à la pression d'évaporation. Elle est donc inférieure à chacun des points d'ébullition des substances pures. Ainsi le mélange d'eau et d'huile essentielle distille à une température inférieure à 100°C à pression atmosphérique. Par contre, les températures d'ébullition des composés aromatiques sont pour la plupart très élevées.

La tension de vapeur des composés aromatiques est très variable. Elle est relativement élevée pour les hydrocarbures monoterpéniques (environ 70 mm Hg pour le limonène à 100°C) mais faible pour les sesquiterpènes (10 mm Hg pour la carvone à 100 °C) [121].

Les premiers co-distillent rapidement alors que la présence de certains composés de faible tension de vapeur rend la distillation des huiles plus difficile. Ainsi, la cinétique d'extraction des huiles essentielles dépend des caractéristiques des molécules odorantes et de la structure anatomique de la matière végétale.

L'hydrodiffusion et la vaporisation ne constituent pas les seuls mécanismes mis en jeu lors de l'hydrodistillation, il faut leur associer la décantation qui fait intervenir une vitesse de transfert de matière entre deux phases liquides. L'isolement de composés volatils après leur distillation est déterminé dans une large mesure par leur degré de solubilité dans l'eau. Par conséquent, l'eau résiduelle peut être plus ou moins saturée en constituants polaires selon la difficulté de séparation des phases.

### **2.1.2 L'hydrodistillation**

Le procédé d'hydrodistillation consiste à immerger la matière première végétale dans un bain d'eau. L'ensemble est ensuite porté à ébullition généralement à pression atmosphérique (Figure II-1). La chaleur permet l'éclatement et la libération des molécules odorantes contenues dans les cellules végétales. La vapeur, chargée de l'essence de la matière première distillée, se condense dans le serpentín de l'alambic avant d'être récupérée dans un essencier. Les parties insolubles dans l'eau de condensation sont décantées et, en raison de sa plus faible densité, l'huile essentielle se place au dessus de la phase aqueuse.

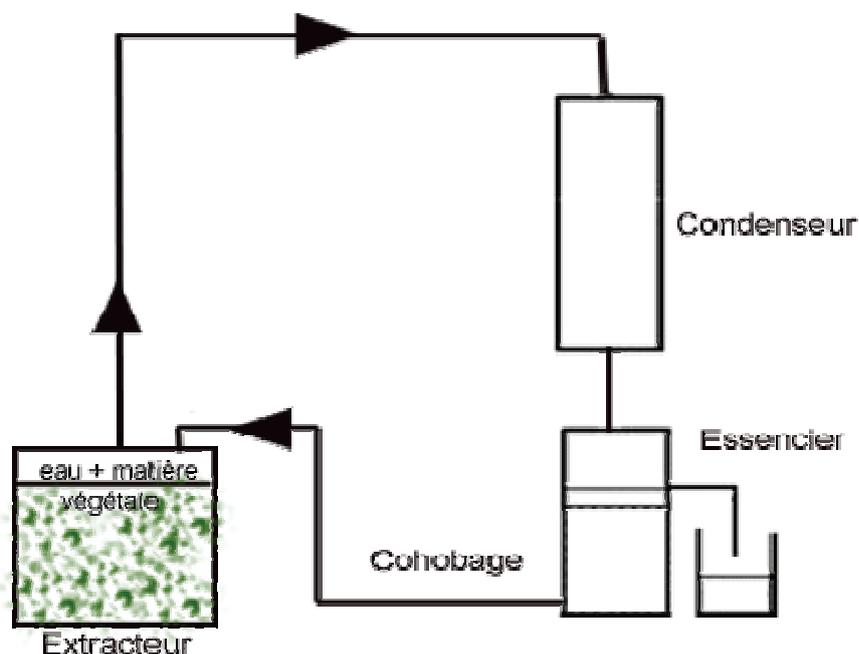


Figure II-1 : Schéma du principe de l'hydrodistillation

### 2.1.3 L'entraînement à la vapeur d'eau

L'entraînement à la vapeur constitue la technique la plus utilisée et la plus aisée à mettre en œuvre pour la production d'huiles essentielles. Dans cette technique la matière végétale à traiter n'est pas en contact direct avec l'eau. De la vapeur d'eau fournie par une chaudière traverse la matière végétale située au dessus d'une grille (Figure II-2). Durant le passage de la vapeur à travers le matériel, certaines cellules éclatent et libèrent l'huile essentielle qui est vaporisée sous l'action de la chaleur pour former un mélange «eau + huile essentielle». Le mélange est ensuite véhiculé vers le condenseur et l'essencier avant d'être séparé en une phase aqueuse et une phase organique.

L'absence de contact direct entre l'eau et la matière végétale, puis entre l'eau et les molécules aromatiques évite certains phénomènes d'hydrolyse ou de dégradation pouvant nuire à la qualité de l'huile.

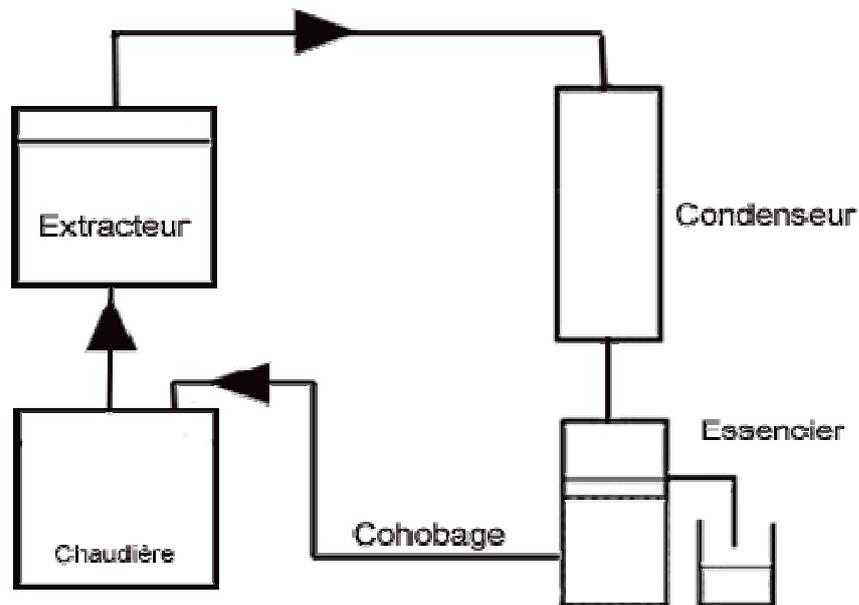


Figure II-2 : Schéma de principe de l'entraînement à la vapeur d'eau

#### 2.1.4 L'hydrodiffusion

L'hydrodiffusion est une variante de l'entraînement à la vapeur. Le principe de l'extraction est basé sur l'action descendante d'un flux de vapeur qui traverse le végétal (figure II-3). L'hydrodiffusion présente l'avantage de ne pas mettre en contact le matériel végétal et l'eau. De plus, l'hydrodiffusion permet la réduction de la durée de la distillation et par conséquent, une économie d'énergie par rapport à la technique précédente où le courant de vapeur est ascendant [122].

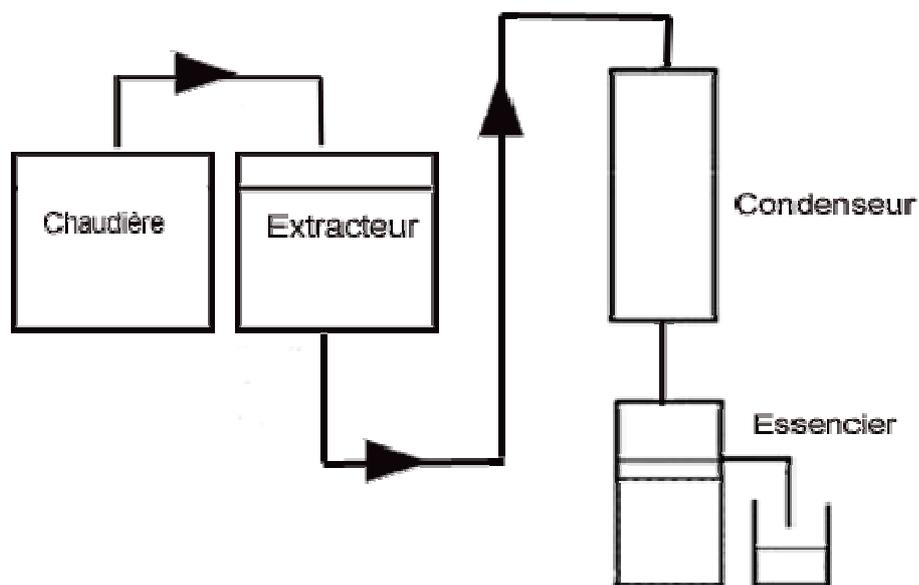


Figure II-3 : Schéma du principe de l'hydrodiffusion

### 2.1.5 La turbodistillation

La turbodistillation est un procédé d'hydrodistillation accélérée en discontinue développée en France par la société DCF-Aromaprocess. Cette technique est prédestinée aux matières premières difficiles à traiter comme les racines, les ligneux ou les graines. Le réacteur contenant la matière végétale est équipé d'une turbine qui permet d'une part, la dilacération des matières végétales, d'autre part, une agitation turbulente, d'où un meilleur coefficient de transfert et une augmentation de la surface de vaporisation. Outre le recyclage des eaux de cohobage, ce procédé permet la récupération des fractions les plus volatiles grâce à un système de condensation secondaire. La présence d'une colonne à plateaux contribue à l'enrichissement des vapeurs en huile essentielle, d'où une amélioration du rapport d'entraînement [118].

### 2.2 L'expression à froid

L'expression à froid est un procédé totalement différent d'une distillation classique. Il est utilisé pour l'extraction des huiles essentielles de fruits d'agrumes. Le principe de cette technique est basé sur la rupture ou la dilacération des parois des sacs oléifères, localisés dans l'écorce des fruits, et sur la pression du contenu de ces sacs sur les parois.

l'expression de type manuel dite « à l'éponge » est remplacée par des procédés beaucoup plus industrialisés et mécanisés afin de diminuer les coûts, d'augmenter les rendements et de préserver le fruit en vue de l'extraction de son jus [119,123] .

### 3. Méthodes d'extractions modernes

Depuis quelques années, on assiste à l'émergence de technologies innovantes dans les procédés d'extraction. Leur originalité réside dans la nature des énergies apportées au milieu d'extraction et le gain de temps dans la durée de l'extraction.

#### 3.1 Extraction par micro-ondes

L'extraction par micro-ondes regroupe plusieurs procédés. Ils découlent des différents procédés d'extraction classiques (hydrodistillation et entraînement à la vapeur) mais dont la source de chauffage est remplacée par les micro-ondes [4,124–126].

- **Entraînement à l'air assisté par micro-ondes «Compressed Air Microwave Distillation CAMD»** proposé en 1989 par Craveiro *et coll*, comme la première technique d'extraction des huiles essentielles sous chauffage micro-ondes [126] . Cette technique repose sur le principe de l'entraînement à la vapeur et utilise de l'air comprimé à la place de la vapeur pour extraire des huiles essentielles. Elle consiste à injecter en continu de l'air comprimé dans le réacteur d'extraction où la matrice végétale est immergée dans de l'eau et chauffée sous micro-ondes. La vapeur d'eau saturée en molécules volatiles est ensuite entraînée vers un vase de récupération plongé dans un système de réfrigération et situé à l'extérieur du four à micro-ondes [126] .

- **Hydrodistillation assistée par micro-ondes sous vide pulsé «Vacuum Microwave Hydrodistillation VMHD»** breveté par Archimex [127], ce procédé est basé sur l'utilisation conjointe des micro-ondes et d'un vide pulsé. Les micro-ondes accélèrent le transfert des molécules à extraire vers le milieu extérieur et le vide pulsé permet de réaliser l'entraînement azéotropique à une température inférieure à 100 °C [4] . La Figure II-4 représente le schéma de principe d'un pilote VMHD, constitué d'une enceinte équipée d'une double enveloppe et d'une pale d'agitation, d'un générateur micro-ondes, d'un système permettant de condenser et de récupérer les vapeurs et des solutions permettant d'appliquer et de réguler le vide dans l'enceinte et de fixer la

température de la double enveloppe. L'extraction par VMHD est 5 à 10 fois plus rapide que l'hydrodistillation classique, pour un rendement équivalent et une huile essentielle de composition identique. Ce procédé permet également de travailler à des températures d'extractions inférieures à 100°C réduisant ainsi les risques de dégradation thermique et la consommation d'énergie [36-38].

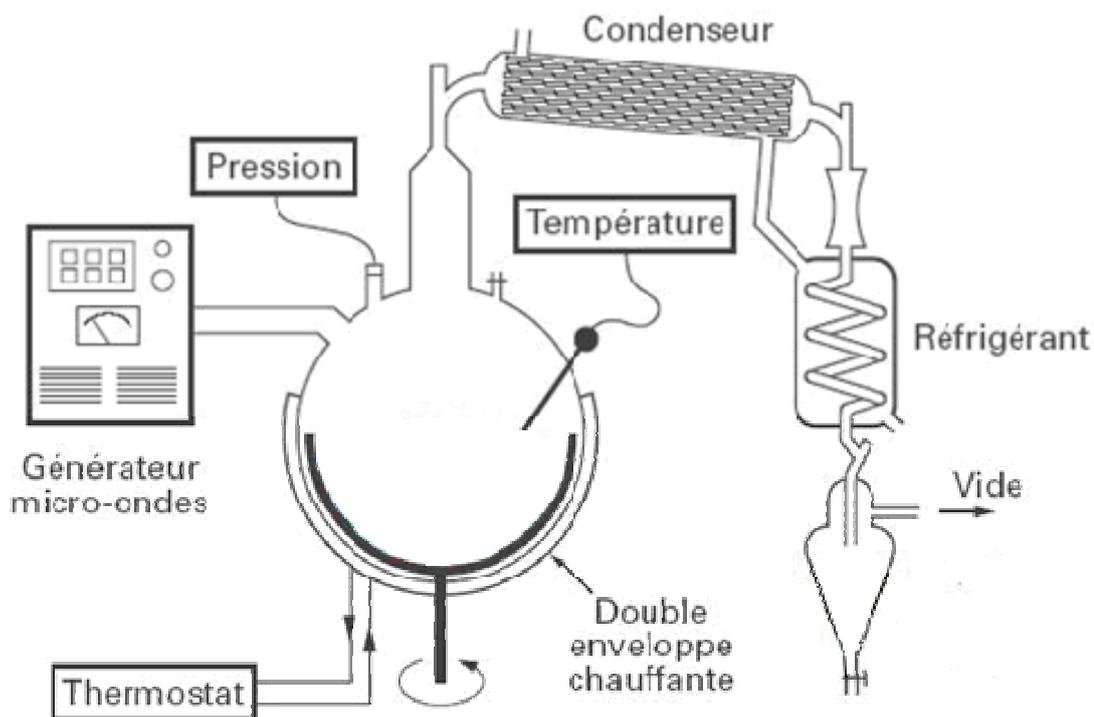
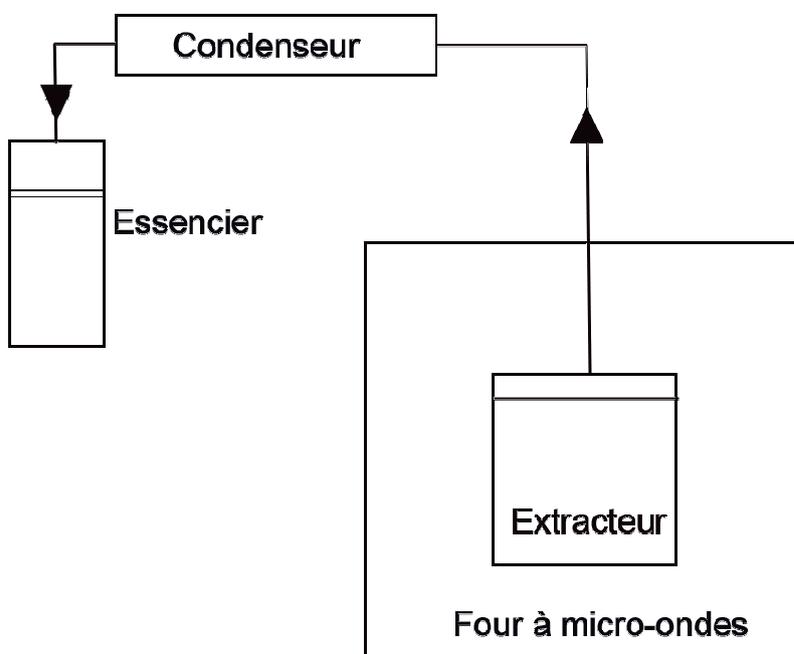


Figure II-4 : Schéma de principe d'un pilote VMHD

▪ **Extraction sans solvant assistée par micro-ondes « Solvent Free Microwave Extraction (SFME) »** L'extraction sans solvant assistée par micro-ondes (SFME) a été développée et brevetée, en 2004, par Chemat *et coll.*[128,129]. Le SFME est l'une des techniques les plus récentes, pour l'extraction des huiles essentielles assistée par micro-ondes, sans solvant et sans eau à pression atmosphérique. Ce procédé décrit une distillation sèche assistée par micro-ondes qui consiste à placer le matériel végétal frais dans un réacteur micro-ondes sans ajouter ni eau ni solvant organique. Le chauffage de l'eau de constitution de la matière végétale permet la libération des huiles essentielles après rupture des glandes les contenant. Les huiles sont alors entraînées par la vapeur d'eau produite à partir de l'eau de la matière végétale. Un système de refroidissement à

l'extérieur du four micro-ondes permet la condensation du distillat. Le procédé SFME est avantageux par rapport à l'hydrodistillation classique d'un point de vue quantitatif et qualitatif puisque les rendements sont similaires ou parfois meilleurs à ceux obtenus par hydrodistillation classique et les huiles essentielles obtenues par SFME présentent une proportion plus importante de composés oxygénés, les plus valorisables sur le plan olfactif. Le procédé SFME est plus économique en temps et en énergie et n'utilise ni solvant organique ni eau [130].

▪ **Hydrodistillation assistée par micro-ondes ou « MAHD : Microwave Assisted Hydrodistillation »** Ce procédé, basé entièrement sur le principe de l'hydrodistillation classique, consiste à placer une partie du montage d'hydrodistillation dans le four à micro-ondes. Le matériel végétal est donc placé en présence d'une quantité d'eau suffisante dans un réacteur disposé dans l'enceinte du four à micro-ondes. Le système de réfrigération ainsi que la partie prévue pour la récupération des essences sont situés à l'extérieur du four [130–132]. Les avantages cités sont la rapidité et la similitude de la composition de l'huile par rapport à une hydrodistillation classique.



**Figure II-5 :** Schéma de principe de l'hydrodistillation assistée par micro-ondes

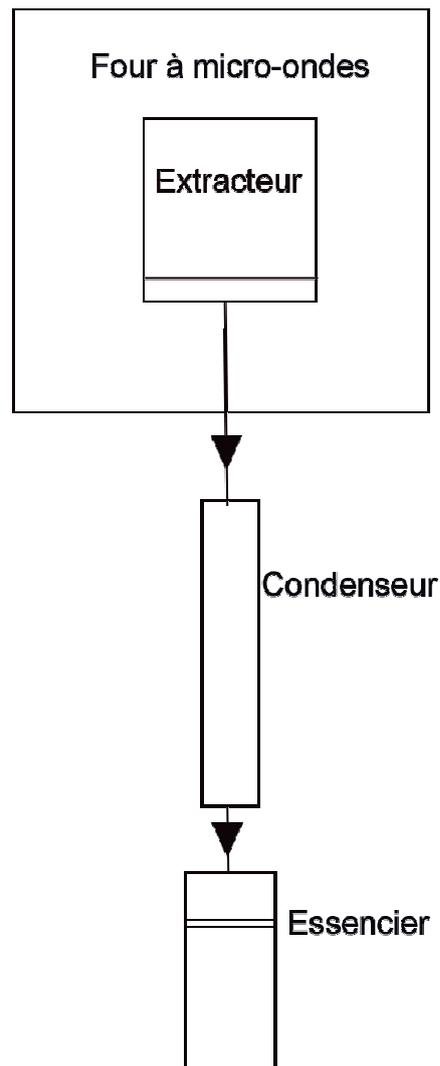
▪ **Extraction sans solvant améliorée assistée par micro-ondes « Improved Solvent Free Microwave Extraction (Improved SFME) »** Improved SFME a été proposée par Wang *et coll.* en 2006 [133]. La méthode réside en l'utilisation d'un montage d'extraction sans solvant assistée par micro-ondes dans lequel une poudre de fer de carbonylique CIP (Carbonyl iron powders) est ajoutée et mélangée avec des matières végétales sèches dans le fond du réacteur.

Les particules sphériques de fer de carbonylique (CIP) sont capables d'absorber une partie de l'énergie micro-onde émise et de la restituer au milieu sous forme de chaleur. Ainsi, le matériel végétal peut être chauffé par simple conduction sans apport d'énergie auxiliaire. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet d'accélérer le temps d'extraction par rapport aux autres méthodes telles que le SFME et le MAHD.

▪ **Hydrodiffusion assisté par micro-ondes et gravité « Microwave Hydrodiffusion and Gravity (MHG) »** L'hydrodiffusion assistée par micro-ondes et gravité a été brevetée par Chemat *et coll.* en 2008 [134–136]. Ce procédé a été conçu pour l'extraction des huiles essentielles de différentes matrices végétales par hydrodiffusion via un rayonnement micro-onde sous pression atmosphérique.

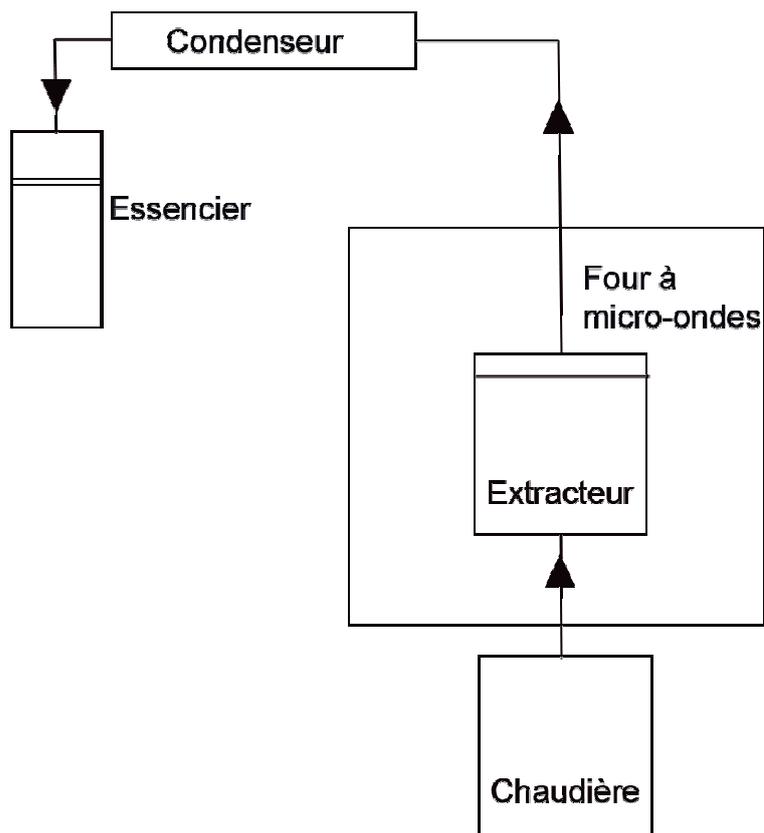
Cette technique consiste à placer le matériel végétal dans un réacteur à l'intérieur du four à micro-ondes, sans ajouter ni eau ni solvant organique. Les micro-ondes provoquent un échauffement de l'eau contenue dans la matière végétale ce qui permet la destruction des cellules contenant l'huile essentielle. Les huiles essentielles ainsi que l'eau interne du matériel végétal sont libérées et transférées de l'intérieur de la plante vers l'extérieur. Il s'agit du phénomène d'hydrodiffusion.

Un système de refroidissement à l'extérieur du four micro-ondes permet la condensation du distillat. Le procédé MHG est avantageux par rapport aux autres méthodes conventionnelles, d'un point de vue quantitatif (des rendements identiques à ceux obtenus par hydrodistillation classique) et qualitatif (le MHG fournit des huiles essentielles de haute valeur). Le procédé MHG se caractérise aussi par un temps d'extraction réduit permettant ainsi une économie d'énergie.



**Figure II-6:** Hydrodiffusion assistée par micro-ondes et gravité

▪ **Entraînement à la vapeur assisté sous micro-ondes « Microwave Steam Distillation (MSD) »** L'entraînement à la vapeur assisté sous micro-ondes (MSD) a été développée par Sahraoui *et coll.* en 2008 [125]. Le procédé repose sur le principe de l'entraînement à la vapeur classique dans lequel une irradiation micro-ondes est exercée uniquement sur le réacteur d'extraction. Le système de réfrigération ainsi que l'essencier pour la récupération d'huiles essentielles sont placés à l'extérieur du four micro-ondes.



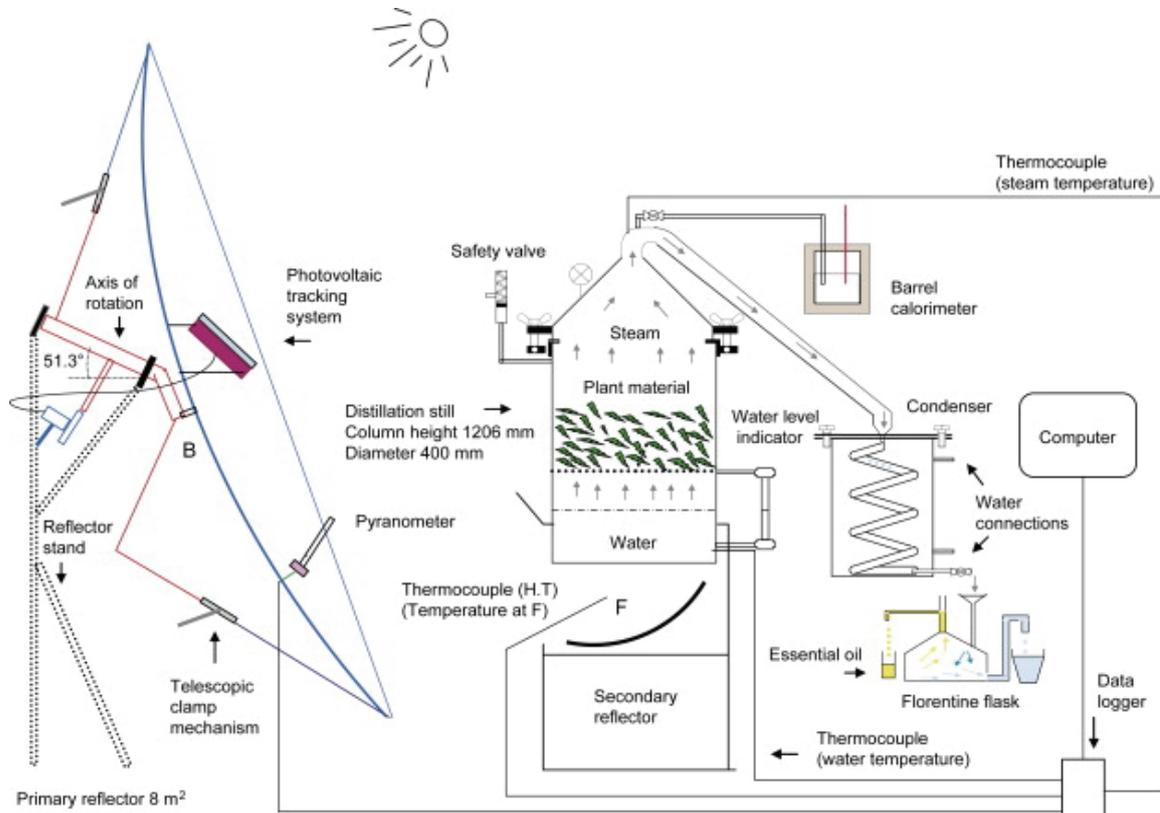
**Figure II-7:** Schéma de principe de l'entraînement à la vapeur assisté sous micro-ondes

### 3.2 Procédés d'extraction et énergies renouvelables

Il existe peu de travaux sur l'utilisation des énergies renouvelables dans les procédés d'extraction des huiles essentielles. A notre connaissance, les seuls travaux qui existent et qui sont à l'échelle expérimentale, sont ceux de Munir *et coll* (2009) de l'université de Kassel en Allemagne [6,137–141] et les travaux de Romero *et coll* (2007) de l'université de Catamarca en Argentine [142,143].

A l'université de Kassel, le dispositif d'extraction des huiles essentielles mis en place utilise l'énergie solaire en tant que source de chaleur et l'énergie de la biomasse comme énergie d'appoint durant les périodes non ensoleillées. Le dispositif (figure II-8) est constitué d'un concentrateur solaire Scheffler composé d'un réflecteur primaire, d'un réflecteur secondaire, et d'un dispositif de surveillance photovoltaïque. Les différents essais d'extraction ont été réalisés sur plusieurs espèces. Les résultats obtenus

concordaient avec ceux obtenus au laboratoire en utilisant un système d'extraction conventionnel à l'énergie électrique.



**Figure II-8** : Schéma du système de distillation solaire [6]

En Argentine, en région semi aride des essais de production d'huiles essentielles de cumin par l'énergie solaire ont été réalisés. Le système de distillation solaire est constitué d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique, d'un système d'extraction de type Clevenger et d'un système de réfrigération classique. Le ballon de verre servant d'extracteur est placé dans un récipient en aluminium rempli de sable et peint en noir. Le sable est utilisé pour uniformiser la chaleur au niveau de l'extracteur. En matière de rendement les résultats obtenus sont similaires à ceux obtenus au laboratoire en utilisant une extraction classique à l'énergie électrique. Par contre, sur le plan qualitatif des différences significatives ont été enregistrées dans la composition chimique des huiles de cumin [142].

#### **4. Equipements d'une unité classique d'extraction d'huiles essentielles**

L'équipement nécessaire pour la distillation dépend de la capacité de production journalière et de la méthode de distillation utilisée. Une unité de production d'huile essentielle est constituée de trois parties essentielles: l'alambic, le condenseur et le séparateur. Néanmoins, si le chauffage n'est pas assuré par un feu nu, un générateur de vapeur ou chaudière s'ajoute à cet ensemble.

##### **4.1 L'alambic ou cuve de distillation**

L'alambic sert de cuve dans lequel le matériel végétal et l'eau ou bien la vapeur, dans le cas d'un entraînement à la vapeur, sont mis en contact pour en extraire l'huile essentielle. La forme de l'alambic est dictée par :

- L'efficacité de la distillation : la hauteur de l'alambic doit être supérieure au diamètre. On recommande une hauteur de l'ordre de 1,5 pour le diamètre de l'alambic. Pour l'hydrodistillation, le diamètre de l'alambic doit être légèrement plus grand que sa hauteur afin d'éviter l'effet de la pression dû à la hauteur de la charge [108,118] .
  
- La facilité de chargement et de déchargement du matériel végétal qui impose la forme cylindrique [108,122,144]. La forme conique fonctionne, probablement, d'une manière intéressante, mais les problèmes de chargement et de déchargement ne sont pas simplifiés [145]. Les alambics à forme cubique ou à section rectangulaire peuvent être facilement chargés, mais il est plus difficile de contrôler la distribution uniforme de la vapeur.

La taille de l'alambic dépend des facteurs économiques et de la capacité de la distillation. Quant au métal, les premiers alambics étaient fabriqués en cuivre. Bien que ce métal soit très malléable, son prix élevé et la dégradation de couleur qu'il provoque font qu'il est, actuellement, remplacé par de l'acier inoxydable. La fabrication des alambics en aluminium n'est pas conseillée pour les huiles contenant des constituants à caractère acide. Pour ces huiles, il est préférable que l'alambic soit fabriqué en utilisant du fer galvanisé [145].

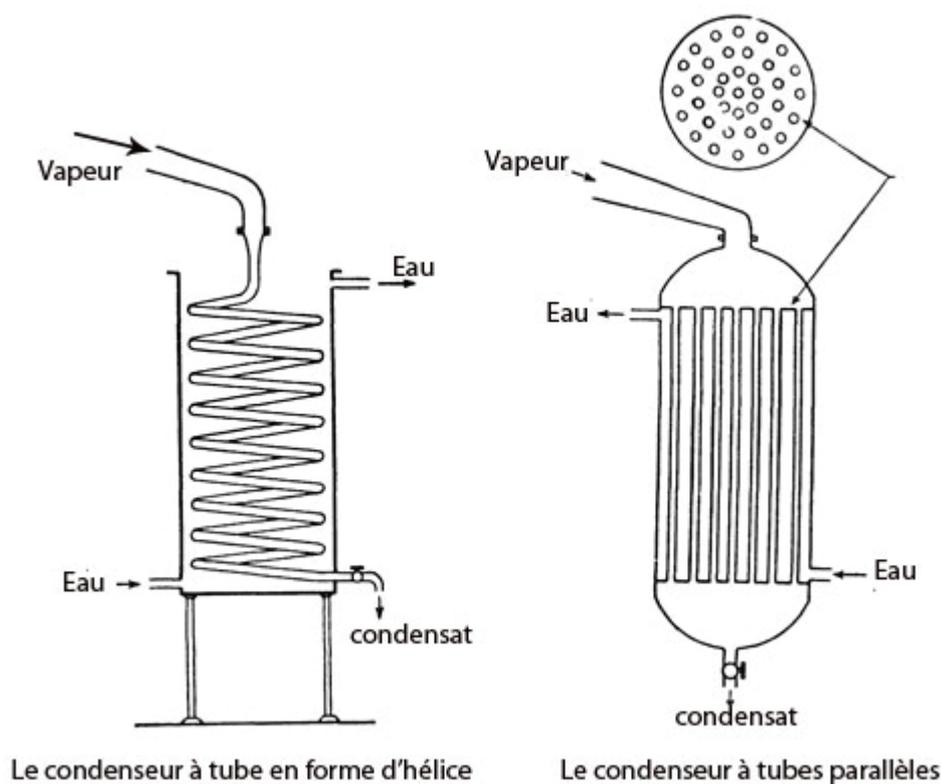
## 4.2 Le condenseur

Le condenseur ou réfrigérant permet de condenser les vapeurs chargées d'huiles essentielles. La longueur du tube du condenseur dépend de la quantité de vapeur à condenser. Il existe sur le marché différents types de condenseurs dont:

- le condenseur à tube en zigzag [108] qui est la forme la plus simple des condenseurs. Il consiste à disposer des tubes en zigzag et l'ensemble est plongé dans un bassin de refroidissement. Une légère inclinaison de l'ensemble facilite l'écoulement du condensât. Le condenseur en zigzag a l'avantage d'être facile à réaliser et à utiliser surtout pour les alambics mobiles installés en campagne sur le lieu même de production de la biomasse. Néanmoins, il est moins efficace que les autres condenseurs et il est surtout difficile à nettoyer lors du changement du matériel végétal.

- Le condenseur à tube en forme d'hélice est conçu pour des quantités de vapeur élevées. Ce condenseur peut être disposé horizontalement ou verticalement. Toutefois, cette dernière disposition est la mieux indiquée car elle facilite l'écoulement du condensât ainsi que le nettoyage du condenseur. Le condenseur à serpentin hélicoïdal peut être constitué de plusieurs spirales, généralement 2 à 3, logées l'une dans l'autre. L'ensemble est plongé dans un récipient cylindrique où circule l'eau de refroidissement.

- Le condenseur à tubes parallèles est formé d'une série de tubes logés dans un long cylindre dans lequel l'eau de refroidissement circule à contre courant. Le condenseur est placé en position légèrement oblique pour permettre un écoulement rapide du condensât. Les condenseurs tubulaires ou à tubes multiples verticaux sont une autre forme des condenseurs à tubes parallèles. Comparativement aux condenseurs à tubes en zigzag et pour une même quantité de vapeur et une même variation de température, les condenseurs à tubes parallèles multiples permettent une économie importante de la surface d'échange. Cette dernière est cinq fois plus faible que dans le cas des condenseurs à tubes en zigzag [146].



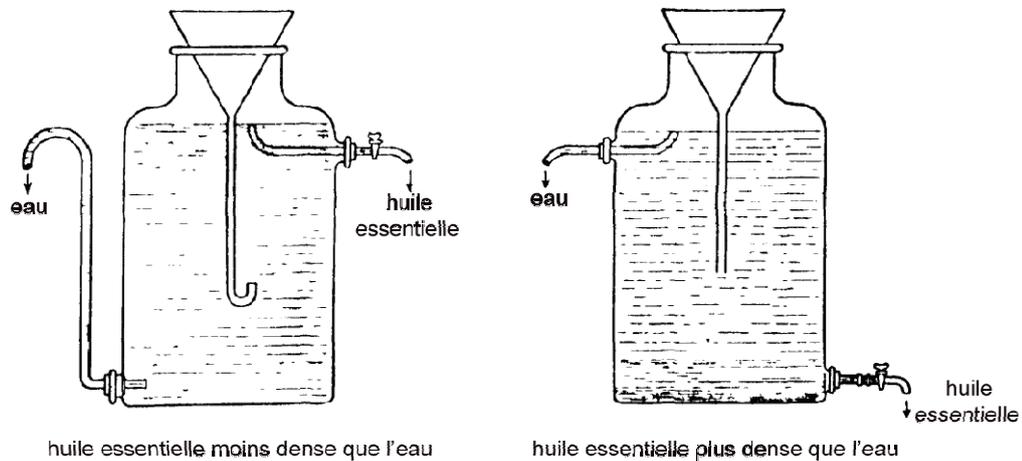
**Figure II-9** : Les différents types de condenseurs

Pour le matériau du condenseur, les huiles essentielles ne doivent pas être en contact avec du fer ou du cuivre car ceux-ci vont colorer l'huile. Seuls l'étain pur et l'acier inoxydable sont recommandés. Cependant des tubes de condenseur en aluminium peuvent être utilisés pour la condensation des huiles essentielles ne contenant pas de phénols [108]. Des tubes de condenseurs en fer galvanisé sont courants dans les distilleries traditionnelles [118].

### 4.3 L'essencier ou le vase florentin

Le séparateur ou essencier, est la troisième partie essentielle de l'équipement d'une distillerie. Sa fonction consiste à séparer l'huile essentielle de l'eau condensée simultanément (hydrolat). Il est aussi appelé vase florentin ou encore décanteur. Il a généralement une forme cylindrique ou rectangulaire [108]. Les huiles se séparent de l'eau par différence de densité. On distingue des huiles légères dont la densité est inférieure à celle de l'eau ( $< 1$ ) et des huiles lourdes dont la densité est supérieure à celle de l'eau ( $> 1$ ). En raison de cette différence, les séparateurs diffèrent par la position

du tube d'évacuation de l'hydrolat et celle du tube de récupération de l'huile (Figure II-10).



**Figure II-10** : Les différents types d'essenciers

Dans certain cas, la phase huileuse est formée de deux parties différentes par leur densité ; l'une a une densité supérieure à celle de l'eau et l'autre une densité inférieure. C'est le cas par exemple, des huiles de graines de persil et de vétiver [118].

Le matériau de l'essencier de petite taille peut être en verre, celui de grande taille (environ 15 litres et plus) est en métal. Les séparateurs en étain pur sont très coûteux : ils sont actuellement remplacés par des séparateurs en cuivre étamé. On trouve le plus souvent des séparateurs en acier inoxydable ou en aluminium [108].

---

---

**CHAPITRE 3**

**Extraction et caractérisation par CG/MS des huiles  
essentiels *d'Arbutus unedo* L. et *d'Erica arborea* L.**

---

---

**Bessah, R. & Benyoussef, E.-H.** 2012 Essential oil composition of *Arbutus unedo* L. leaves from Algeria. *Journal of Essential Oil-Bearing Plants* **15**, 678-681.

**Bessah, R. & Benyoussef, E.-H.** Essential oil composition of *Erica arborea* L. leaves from Algeria. *Journal of essential oil-bearing plants JEOP*. (Sous presse)

Les huiles essentielles des feuilles d'*Arbutus unedo* L. et d'*Erica arborea* L ont été extraites par hydrodistillation et analysées par CG/MS. Dans ce chapitre nous exposons les protocoles opératoires des méthodes utilisées, les caractéristiques botaniques et la valorisation des deux espèces étudiées. Les résultats des études quantitative (cinétique d'extraction) et qualitative (composition des huiles essentielles) seront discutés au cours de ce chapitre.

### 1. Lieu de végétation

Toute la matière végétale utilisée pendant ce travail a été récoltée dans la région d'Alger au niveau de la forêt de Bainem. La forêt de Bainem se situe au niveau du massif de Bouzaréah à 15 km à l'ouest d'Alger. Elle s'étend sur une superficie de 700 ha, ses coordonnées géographiques sont de 3°02 longitude Est et de 36°49 latitude nord [147].

Le climat du site d'échantillonnage est de type méditerranéen qui se caractérise par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides [148]. La pluviosité moyenne annuelle est de l'ordre de 800 mm/an. La température moyenne annuelle est de 16°C. La moyenne des températures maximales du mois le plus chaud est de 28°C (août étant le mois le plus chaud). La moyenne des températures minimales du mois le plus froid est de 8°C (janvier étant le mois le plus froid). Le quotient pluviothermique (indice climatique) d'Emberger  $Q^2$  [149] faisant intervenir trois éléments fondamentaux, la pluie, la température et l'évaporation. Ce quotient égal à 127.7, place notre zone d'étude dans l'étage bioclimatique subhumide à hiver chaud.

Sur le plan floristique la forêt de Bainem est caractérisée par un grand mélange d'essences forestières comme l'eucalyptus, le *Pinus halepensis* L. (Pin d'Alep) et le *Quercus suber* L. (Chêne liège) et un sous bois plus ou moins dense constitué principalement de *Cistus monspeliensis* L., *Cistus salvifolius* L., *Arbutus unedo* L., *Pistacia lentiscus* L., *Erica arborea* L., *Calycotum spinosa* L., *Myrtus communis* L., *Olea europea* L., et *Quercus coccifera* L.

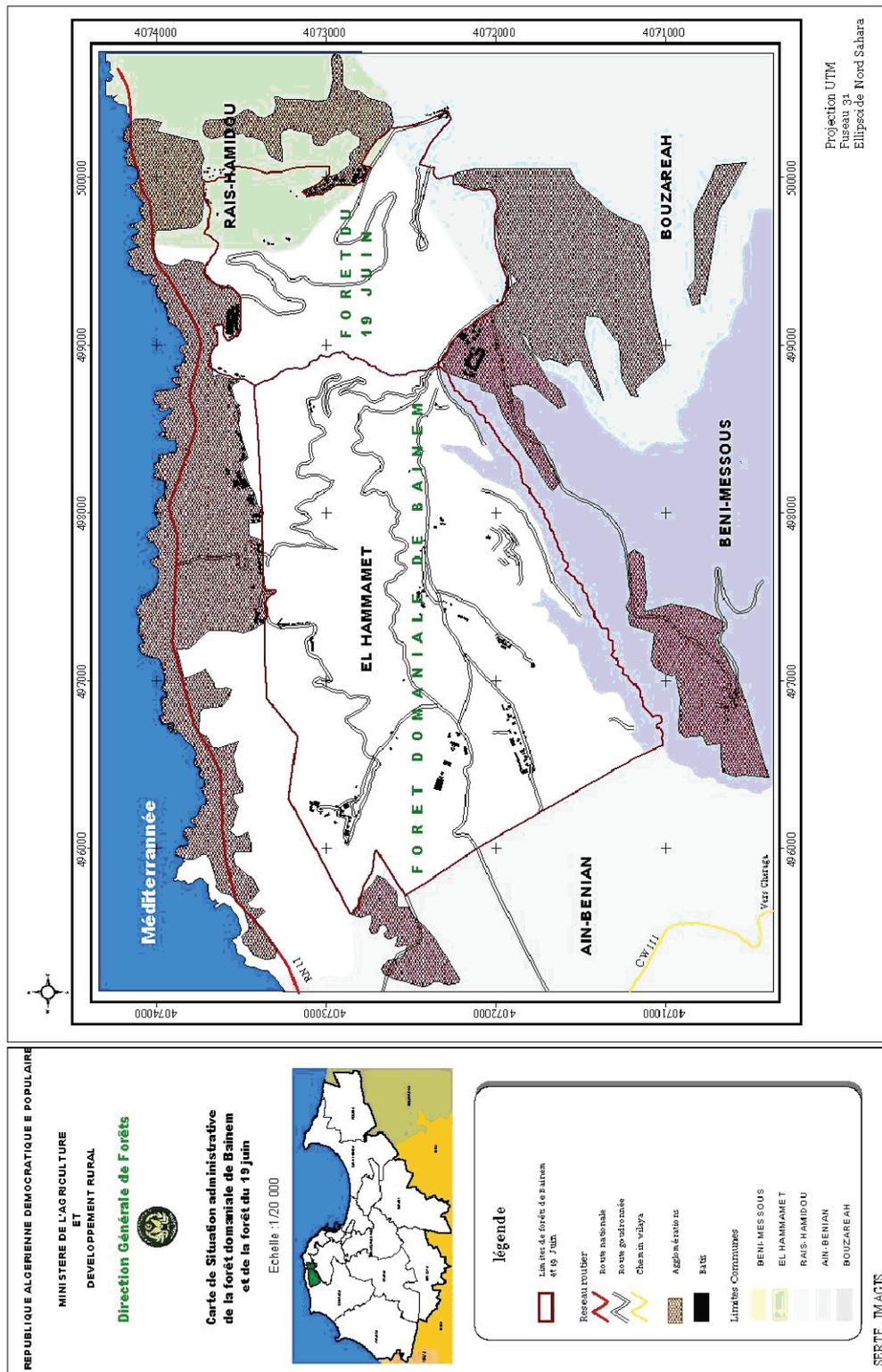


Figure III-1 : Localisation de la forêt de Bainem [147]

Pour notre travail de recherche nous avons choisi deux espèces : l'arbousier (*Arbutus unedo* L.) et la bruyère arborescente (*Erica arborea* L.). L'identité et la systématique des deux plantes ont été confirmées au niveau de l'arboretum de Bainem de L'Institut National de la Recherche Forestière (INRF). Les échantillons d'arbousier et de bruyère ont été récoltés en pleine floraison.

La récolte des deux plantes choisies a été faite de façon aléatoire, c'est-à-dire sans choisir forcément des plants de même âge et de même taille. En outre, il n'est généralement pas possible de collecter des données sur toute l'étendue de la communauté végétale. Ainsi une aire de relevé a été identifiée.

Après la récolte, les plantes sont séchées à l'air libre pendant 10 jours afin d'éviter leur altération, leur fermentation et la perte de leurs principes actifs. Elles sont ensuite entreposées dans des sachets en papier, à température ambiante au laboratoire, jusqu'à utilisation.

## **2. Le Matériel végétal**

### **2.1 *Arbutus unedo* L.**

#### **2.1.1 Description morphologique**

*Arbutus unedo* L., communément appelé arbousier, est un arbuste de la famille des éricacées originaire du bassin méditerranéen [150]. L'arbousier est une espèce assez rustique, dont l'aire de répartition s'étend du Sud de l'Europe remonte le long des côtes atlantiques jusqu'en Bretagne à l'Asie occidentale et en Afrique du nord, où le climat est doux et les étés secs. En Algérie l'arbousier est bien représenté dans le Tell [151]. L'arbousier préfère les sols acides, riches et bien drainés et une exposition ensoleillée.

L'arbousier est un arbuste à tige dressée, pouvant atteindre 1 à 4 m. de haut. Les jeunes rameaux sont rouges, rudes et poilus. Le tronc, qui peut avoir jusqu'à 35 cm. de diamètre, est recouvert d'une écorce écailleuse rouge brun [150].



**Figure III-2** : Planche botanique d'*Arbutus unedo* L. [152]

Famille : *Ericaceae*

Genre: *Arbutus*

Espèce: *Arbutus unedo* L.

Les feuilles, persistantes et à pétiole très court, sont coriaces, ovales, allongées, dentées en scie et glabres. D'un vert brillant et foncé à la face supérieure, elles sont plus pâles à la face inférieure. Les fleurs, groupées en petites grappes composées courtes et élargies, sont blanchâtres, vertes au sommet, en forme de petites cruches ventrues à ouverture rétrécie. Les fleurs apparaissent en septembre-octobre, en même temps que les fruits. Les arbouses, fruits de l'arbousier sont de petites baies charnues à peau rugueuse et sphériques de 1 à 3 cm de diamètre. Elles sont de couleur orangée à rouge vif, à maturité. La chair est molle, plus ou moins parfumée et douceâtre, de couleur jaune. Les fruits de l'arbousier mettent un an pour arriver à maturité. Il n'est pas rare de voir le même rameau porter les fleurs de l'année et les fruits mûrs nés des fleurs de l'année précédente.

## **2.1.2 Usages de l'arbousier**

### **2.1.2.1 Usages culinaires**

L'arbousier est une plante mellifère. Il produit un miel à saveur très caractéristique, très forte et épicée. Il est utilisé dans certaines pâtisseries et confiseries. On le trouve également dans des vinaigres aromatiques. Il est antiseptique, urinaire et diurétique [153]. En Italie, le miel monofloral de l'arbousier, assez rare, se vend au prix de 15-18 €/kg.[154].

L'arbose, d'une saveur aigrelette, est utilisée en confiture, marmelade compote et gelée. De la fermentation de l'arbose on en retire une liqueur vineuse appelée «crème d'arbose».

En Algérie le "Sasnou" (arbose) est connu chez les Oranais sous la dénomination de "l'invité des marchés". C'est un fruit qui a une durée de consommation très limitée et ne dure pas longtemps sur les étals. Les consommateurs l'achètent avec un plaisir non dissimulé, en dépit de son prix parfois excessif. "Sasnou", ce fruit succulent, tendre, exquis, et rafraîchissant est en compétition avec d'autres fruits mêmes les plus exotiques, tant en termes de disponibilité que de rapport qualité/prix.

En Italie, l'arboise est utilisée pour la production de vinaigre. Au Portugal on en fait une eau de vie appréciée et exportée (arguadente de medronho). En Espagne, l'arboise est très prisée. Elle entre dans la composition de certains gâteaux.

### 2.1.2.2 Propriétés médicinales

En médecine traditionnelle, les feuilles, les fruits et les racines d'*A. unedo* sont utilisés pour leurs propriétés astringentes, diurétiques, antioxydantes [155–159], antiseptiques des voies urinaires et respiratoires [160] antimicrobiennes [161,162], anti-diarrhéiques [163] et dépuratives. Les fleurs possèdent des propriétés sudorifiques réputées [150]. Nouvellement, l'arbousier est utilisé dans la thérapie de certaines maladies, telles que l'hypertension, le diabète [164,165], dans le traitement des maladies inflammatoires [166] et cardiovasculaires [167–169]. Les extraits d'acétate d'éthyle des feuilles *A. unedo* présentent un effet antiagrégant sur les plaquettes humaines [167,170]. Ces extraits ont montré une activité chimiopreventive potentielle lors du développement des cancers [171].

En Italie, les feuilles d'arbousier sont employées pour préparer une décoction utilisée en bain de siège contre les hémorroïdes [163].

Au Maroc, la décoction des feuilles est utilisée contre les calculs urinaires. Celle d'écorce est préconisée contre les douleurs gastriques [172]

En Turquie, le thé préparé à partir des feuilles d'*A. unedo* est utilisé comme diurétique [173].

En Algérie, le fruit de l'arbousier est utilisé dans le traitement de certaines maladies virales qui prolifèrent en hiver, en raison de sa riche composition en vitamine C. Ses feuilles sont vendues par certains herboristes qui l'utilisent comme remède contre les maladies inflammatoires des articulations et du dos, les maladies des voies urinaires et des artères et dans les diarrhées [174]. A Médéa, l'arbousier connu sous le nom de **Lendj**, est utilisé pour ses actions anti-diarrhéique, anti-inflammatoire, antiseptique, urinaire, astringente, dépurative.

### 2.1.2.3 Composition phytochimique

Les propriétés médicinales de l'arbousier sont liées à sa richesse en substances naturelles [175–178]. En effet, des études phytochimiques réalisées sur cette plante ont révélé la présence de principes actifs:

- des huiles essentielles au niveau des feuilles dont les principaux composés sont (E)-2-décenal,  $\alpha$ -terpinéol, l'acide hexadécanoïque, et (E)-2-undécenal. [179,180] et au niveau des fruits : trans-2-hexen- 1-01, methyl butanoate and butyl butanoate [181].
- des triterpénoïdes ( $\alpha$ -amyrine acétate, l'acide bétulinique et lupéol) [182]
- des polyphénols (flavonoïdes) : arbutine catéchine gallate, myricétine, rutine, afzelin, juglanin, avicularin, quercitrine, hyperoside, isoquercitrine,...[157,183–186]
- des lipides et des tannins [155,171,187].
- Anthocyanidines , des vitamines C et E ( $\alpha$ -tocophérol), des caroténoïdes [155,180,188–191].

### 2.1.2.4 Autres usages

L'écorce de l'arbousier brun rouge foncé, se détache en lanières fibreuses. Elle est utilisée pour le tannage des peaux. En Libye, les racines sont employées pour teindre les peaux en rouge. Le bois de l'arbousier, très fin, est relativement facile à travailler et à polir. Il sert en tournerie, en marqueterie et en tabletterie. La souche permet de fabriquer des pipes appréciées par les connaisseurs. La carbonisation fournit un excellent charbon de bois.

## **2.2 *Erica arborea* L.**

### **2.2.1 Description morphologique**

*Erica arborea* L., communément appelé la bruyère arborescente et bouhaddad en arabe, est une plante vivace très ramifiée de la famille des éricacées. *E. arborea* est un arbuste à feuilles persistantes qui pousse en général de 1 à 4 m de hauteur. Il est originaire du sud-ouest de l'Europe, de la région méditerranéenne et de l'Afrique du Nord [151].

La bruyère arborescente se distingue par sa tige dressée pourvue de rameaux blanchâtres et couverts de poils [192]. Les feuilles en forme d'aiguille sont en verticilles de trois, très étroites et ne dépassant pas les 5 mm de long. Elles sont glabres d'un vert foncé, brillant, et rainurées sur la face inférieure. Les fleurs, petites blanches en grappes terminales apparaissent au début du printemps (mars - avril). Le fruit est une capsule glabre et les graines sont minuscules. La floraison a lieu à partir de Février jusqu'à Juin

### **2.2.2 Usages de la bruyère**

#### **2.2.2.1 Usage culinaire**

La bruyère est une plante mellifère qui produit un miel présentant des caractéristiques organoleptiques très originales. Il se distingue par sa teinte rousse, son odeur prononcée de réglisse et son arôme de caramel et de cacao [153]. Sa saveur caramélisée en fait un miel qui se marie bien avec les préparations aux fruits. C'est un excellent miel à déguster simplement sur des tartines. Il peut aromatiser les yaourts et les fromages blancs. Il est riche en sels minéraux et en oligoéléments. Il est antiseptique, diurétique et reconstituant.

En Ecosse, la bruyère est utilisée à la place du houblon pour l'aromatisation de la bière traditionnelle écossaise « *Heather Ale* ».

#### **2.2.2.2 Propriétés médicinales**

En médecine traditionnelle, les feuilles et les fleurs d'*E. arborea* sont utilisées en décoction pour leurs effets diurétique [173], antiseptique urinaire [193], dépuratif et désintoxiquant [174]. Elles sont proposées pour le traitement des lithiases rénales, des cystites, de la goutte [194,195] et de la schistosomiase.

Préparées en cataplasme, les sommités fleuries d'*E. arborea* soulagent les engelures et les douleurs rhumatismales. Selon une vieille recette trouvée dans le livre de Dioscoride, les

feuilles et les fleurs d'espèces d'*Erica* appliquées en cataplasme, neutralisent la morsure des serpents [196].

Les activités pharmacologiques des extraits d'*Erica arborea* L. ont été également signalées par de nombreux auteurs. Effets anti-inflammatoire et anti-nociceptive [197,198], antioxydant et analgésique [199–201]

En Algérie, la bruyère est connue sous le nom de **khelnedj** dans la région de Médéa et **Bouhadad** dans la région de Batna. Elle est utilisée en décoction pour ses effets astringent, diurétique, antiseptique, uro-génitale et dépuratif.

### 2.2.2.3 Composition phytochimique

*Erica arborea* L. est riche en composés actifs tels que :

- Les flavonoïdes [202]
- Les monoterpènes [168–171]
- Les triterpénoïdes [203]
- Les glucosides phénylpropanoïdes [204,205] et les tanins condensés [206].

### 2.2.2.4 Autres usages

Le rhizome d'*E. arborea* présente l'aspect d'un gros bulbe de couleur rouge pesant plus d'un kilogramme. Il est utilisé pour la fabrication des ébauchons de pipes (pipes de bruyère). Excellent combustible, il fournit un remarquable charbon de bois [192]. Les branches sont utilisées dans la fabrication de ballais de jardin.



**Figure III-3:** Planche botanique d'*Erica arborea* L. [152]

Famille : *Ericaceae*

Genre: *Erica*

Espèce: *Erica arborea* L.

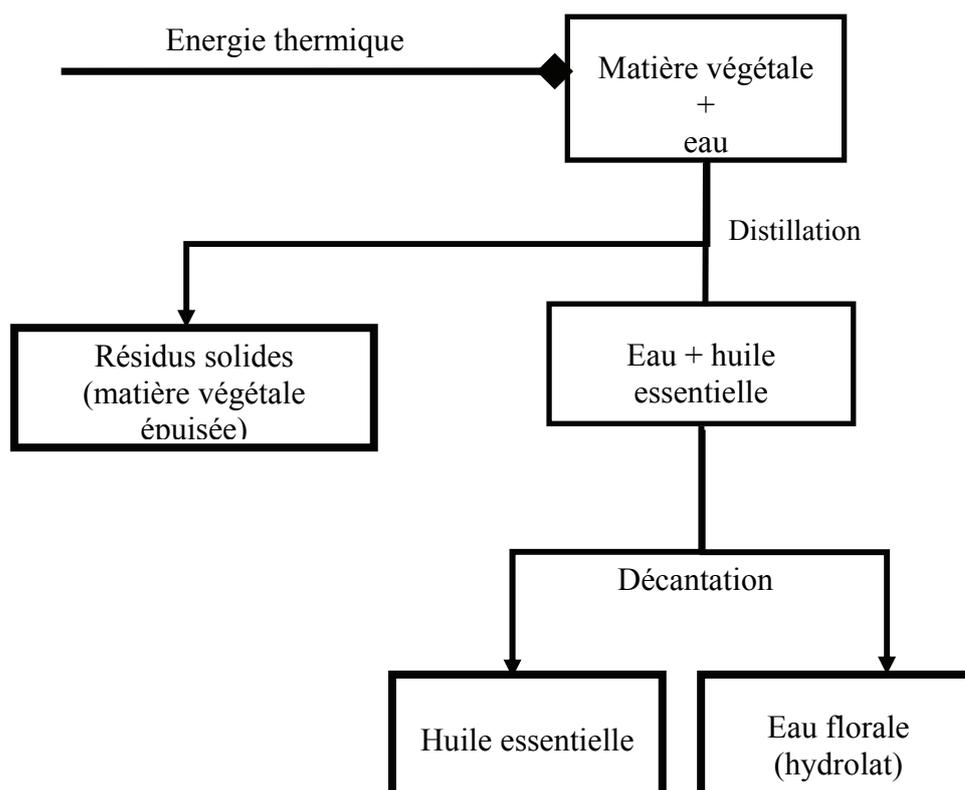
### 3. Extraction des huiles essentielles

#### 3.1 Mise en œuvre de l'hydrodistillation

L'hydrodistillation a été menée dans un montage de laboratoire de type Clevenger sans système de cohobage. Il est composé de trois parties principales [207] :

- Le réacteur (extracteur), un ballon dans lequel on introduit la matière et l'eau,
- Le réfrigérant (condenseur) dans lequel se condensent les vapeurs,
- Le vase florentin ou essencier où vont se séparer la phase organique et la phase aqueuse.

La figure III-4 résume d'une manière simplifiée les principales étapes d'extraction des huiles essentielles d'arbousier et de bruyère



**Figure III-4** : Schéma simplifié du procédé d'extraction des huiles essentielles

Le protocole expérimental utilisé pour l'extraction des huiles essentielles des deux plantes choisies, a été mis en place après plusieurs expériences préliminaires. Les paramètres modifiés au fil des expériences correspondent à la charge de la matière

végétale traitée, à la durée de l'hydrodistillation ainsi qu'au débit de vapeur. L'hydrodistillation a été conduite à pression atmosphérique. La production de vapeur d'eau a été assurée par un chauffe-ballon électrique d'une puissance nominale de 500W.

La matière végétale (100g), baignant dans 1200 mL d'eau bouillante, est disposée dans un ballon à deux cols, d'une capacité de 2 litres, relié à un réfrigérant. La vapeur d'eau produite entraîne les constituants volatils qui, après condensation dans le réfrigérant, sont recueillis dans le récipient de recette. L'huile est ensuite séparée du distillat par extraction liquide-liquide au moyen de l'éther diéthylique

Afin de disposer d'informations cinétiques sur le procédé d'hydrodistillation, des deux espèces étudiées, nous avons suivi l'évolution du rendement en huile essentielle en fonction de la durée d'extraction par prélèvement du distillat à différents temps d'extraction. Le rendement (R) en huile est déterminé par le rapport de la masse d'huile essentielle extraite (m) sur la masse totale de la matière végétale sèche ( $M_V$ ). Le rendement en huile essentielle est exprimé en g d'huile essentielle par 100 g de matière végétale sèche.

$$R (\%) = \frac{m}{M_V} \times 100 \quad (\text{III-1})$$

Le taux d'humidité  $T_H$  contenue dans la matière végétale a été évalué à 27.14 % pour la bruyère et 32.5 % pour l'arbousier, au moyen de la méthode d'entraînement de l'eau au xylène de Dean et Starck [208].

$$M_V = M_H (1 - T_H) \quad (\text{III-2})$$

$M_V$  : Masse de matière végétale sèche en grammes  
 $M_H$  : Masse de matière végétale humide en grammes  
 $T_H$  : Taux d'humidité

L'erreur expérimentale pour l'ensemble des essais a été déterminée statistiquement sur la base de 05 essais répétitifs. Elle est estimée comme étant le plus grand écart par rapport à la moyenne des essais.

### 3.2 Analyse CG/MS

Le couplage chromatographie en phase gazeuse – spectrométrie de masse est aujourd’hui une des techniques parmi les plus utilisées de la chimie analytique [209]. Dans le secteur des huiles essentielles cette méthode est devenue la technique de référence [210]. Le couplage de la chromatographie en phase gazeuse avec la spectrométrie de masse (CG/MS) permet d’effectuer simultanément la séparation et l’analyse des différents constituants d’un mélange complexe [211].

L’analyse des substances volatiles a été effectuée par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse, sur un appareillage Hewlett Packard de type 6890. Le chromatographe est équipé d’une colonne capillaire de type HP5 de 30 m x 0,25 mm de diamètre interne et 0,25 µm d’épaisseur de film. Les conditions de température, de même que d’analyses chromatographiques, sont résumées dans le tableau III-1.

**Tableau III-1 : Conditions d'analyse de la CG/MS**

|                              |  |
|------------------------------|--|
| Chromatographe               | Hewlett-Packard model 6890                                       |
| Spectromètre de masse        | Hewlett-Packard model 5973                                       |
| Colonne                      | HP5MS  |
| Voltage d'ionisation         | 70 eV  |
| Température injecteur        | 250 °C   |
| Température interface        | 280 °C   |
| Température source           | 230 °C   |
| Température quadripôle       | 150 °C   |
| Programmation de température | 60°C $\xrightarrow{3^{\circ}\text{C}/\text{min}}$ 250°C (15 min) |
| Volume d'injection           | 5 µL   |
| Gaz vecteur                  | Hélium   |
| Débit                        | 1 mL/min. en mode split (1/50)                                   |

### 3.3 Identification des constituants

Les analyses CG/MS ont permis d'acquérir les spectres de masse des différents composés constituant les huiles essentielles des deux plantes étudiées. L'identification chimique des constituants des huiles essentielles a été réalisée sur la base de la comparaison des spectres de masse avec ceux de la banque de données fournies par le logiciel Chemstation (NIST 2002 et Wiley version 7.0). Par ailleurs, une injection d'une série d'alcane linéaires (C<sub>8</sub> à C<sub>27</sub>), dans les mêmes conditions que celles des huiles essentielles extraites, a permis le calcul des indices de rétention de tous les constituants des huiles selon la relation applicable en programmation de température [212].

$$RI_i = 100 \left[ \frac{t_r(i) - t_r(n)}{t_r(n+1) - t_r(n)} \right] + 100 \times n \quad (\text{III-3})$$

Avec :

$t_r(i)$ : Température de rétention du composé

$t_r(n)$ : Température de rétention de l'alcane (n) qui précède le composé.

$t_r(n+1)$ : Température de rétention du l'alcane (n+1).

n : nombre de carbones qui composent la chaîne de l'alcane (C<sub>n</sub>H<sub>n+2</sub>).

Les indices de rétention ont été définis par Kováts en 1958. A chaque produit (i) est associé un indice de rétention RI(i), cet indice est basé sur un système d'étalonnage par des hydrocarbures linéaires. En programmation de température Van den Dool et Kratz (1963) proposèrent de calculer une grandeur (I<sub>p</sub>), semblable à l'indice de rétention isotherme (RI) de Kováts, en remplaçant dans l'expression de ce dernier le logarithme de la température de rétention réduit directement par la température (ou le temps) de rétention.[213].

L'identification des constituants a été faite sur la base de la comparaison de leurs indices de rétention avec ceux des composés de la banque de données informatisée de NIST 98

[214] . L'analyse quantitative a été faite en assimilant la quantité du constituant au pourcentage de la surface du pic

## 4. Résultats et Discussion

### 4.1 Les huiles essentielles de l'arbousier

#### 4.1.1 Composition chimique

Les résultats obtenus par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (CG/MS) de l'huile essentielle des feuilles d'*Arbutus unedo* L. sont représentés par le profil chromatographique en figure III-5.

Le tableau III-2 compile les données expérimentales de 53 composés identifiés et représentant environ 95 % de l'huile d'arbousier (temps de rétention, indices de Kovats calculés, et les pourcentages des différentes molécules).

L'huile essentielle des feuilles *Arbutus unedo* L est caractérisée par une teneur élevée en acides linoléique (18.8 %) et palmitique (35.2 %) et la présence d'hydrocarbures aliphatiques lourds comme l'heptacosane (3 %) et nonacosane (4 %). Le (E)-2-décénal, l' $\alpha$ -terpinéol et (E)-géranyleacétone sont présents en faibles quantités.

La composition chimique de l'huile essentielle extraite des feuilles d'arbousier de la région d'Alger diffère de celle des feuilles d'arbousier en provenance de Turquie. Dans le tableau III-3 sont donnés les différents constituants majoritaires de ces deux huiles. L'huile essentielle des feuilles d'arbousier originaire de Turquie [179] se caractérise par la présence en teneur élevée du  $\alpha$ -terpineol, le (E)-2-decenal et l'acide palmitique. *Arbutus unedo* L. de l'Algérie pourrait être un chémotype à acide palmitique, acide linoléique et 2,6-di-tert-butyl-p-cresol qui n'est pas rapporté par la littérature.

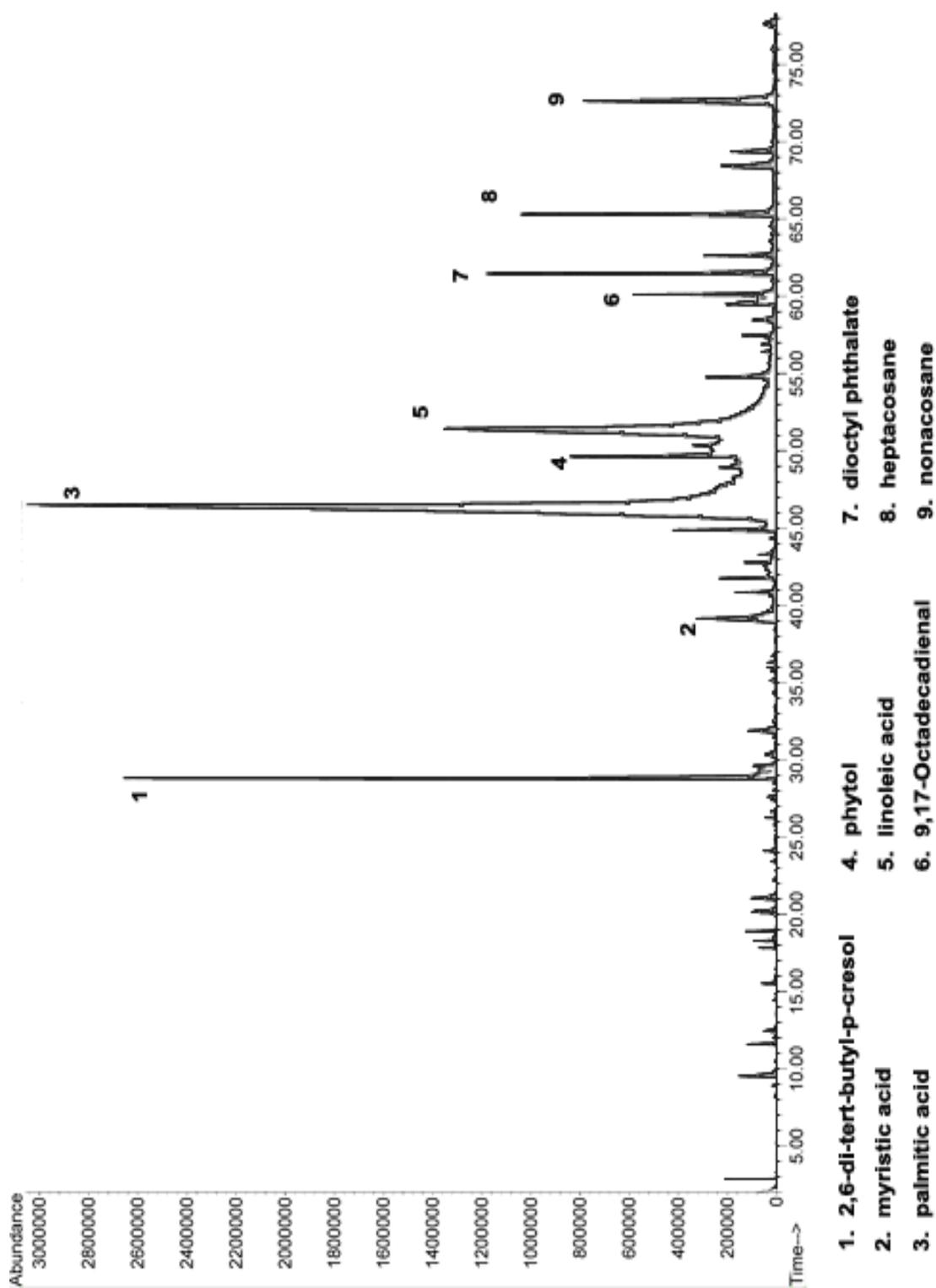


Figure III-5 : Profil chromatographique de l'huile essentielle des feuilles d'arbusier

**Tableau III-2: Composition de l'huile essentielle de feuilles d'*Arbutus unedo* L.**

| <b>Composés</b>  | <b>RI</b> | <b>%</b> | <b>Composés</b>                          | <b>RI</b> | <b>%</b>    |
|--|-----------|----------|--|-----------|-------------|
| 2-éthylhexanol   | 10150.1   |          | dihydroactindiolide                      | 1506      | 0.5         |
| alcool benzylique  | 10320.6   |          | p-methoxycinnamaldehyde                  | 1524      | 0.4         |
| 1-octanol  | 10590.1   |          | megastigmatrienone                       | 1553      | 0.1         |
| Nonanal  | 10880.4   |          | acide dodecanoïque (laurique)            | 1580      | 1.1         |
| Linalool   | 10910.2   |          | alloaromadendrene epoxyde                | 1638      | 0.1         |
| phenylethyl alcohol  | 11100.2   |          | 2-pentadecanone                          | 1674      | 0.2         |
| Borneol  | 11560.1   |          | 1,15 hexadecadiene                       | 1690      | 0.2         |
| 4-Terpineol  | 11640.1   |          | 2,6-Diisopropylnaphthalene               | 1701      | 0.1         |
| a-Terpineol  | 11810.3   |          | acide tetradecanoïque (myristique)       | 1774      | 2.7         |
| acide octanoïque (caprylique)                              | 11900.3   |          | hexahydrofarnesyl acetone                | 1825      | 0.8         |
| β-cyclocitral  | 12020.2   |          | acide phtalique                          | 1852      | 0.6         |
| 2-Decenal, (E)-  | 12580.6   |          | acide pentadecanoïque                    | 1876      | 0.5         |
| Vitispirane  | 12770.3   |          | 2-ethylhexyl laurate                     | 1882      | 0.3         |
| acide nonanoïque (pelargonique)                            | 13080.8   |          | farnesyl acetone                         | 1898      | 0.2         |
| 2,4-Decadienal, (E,Z)-                                     | 1319Tr    |          | dibutyl phthalate                        | 1965      | 1.1         |
| 2-methoxy-4-vinylphenol                                    | 13240.5   |          | <b>acide hexadecanoïque</b> (palmitique) | 2017      | 35.2        |
| β-damascenone  | 13660.2   |          | phytol                                   | 2084      | 3.8         |
| acide décanoïque (caprique)                                | 13780.4   |          | <b>9,12 acide octadécadienoïque</b>      | 2156      | 18.8        |
| β-caryophyllene  | 13900.1   |          | tricosane                                | 2300      | 1.5         |
| hydroxydihydroedulan                                       | 14110.1   |          | 9,17-Octadecadienal                      | 2340      | 1.1         |
| (E)-geranyl acetone  | 14230.3   |          | dioctyl phthalate                        | 2394      | 2.9         |
| 2,6-di(t-butyl)-4-hydroxy-4-methyl-2,5-cyclohexadien-1-one | 14510.2   |          | Hexacosane                               | 2600      | 0.8         |
| β-ionone   | 14570.2   |          | Heptacosane                              | 2700      | 3.0         |
| 2-tridecanone  | 14670.1   |          | Octacosane                               | 2800      | 1.2         |
| α-farnesene  | 14780.1   |          | Squalene                                 | 2829      | 0.7         |
| Butylated hydroxytoluene                                   | 14876.2   |          | Nonacosane                               | 2900      | 4.0         |
| 2,4-di-t-butylphenol                                       | 15030.5   |          | <b>TOTAL</b>                             |           | <b>95.1</b> |

RI indice de rétention      % : surface relative      Tr : trace < 0.1

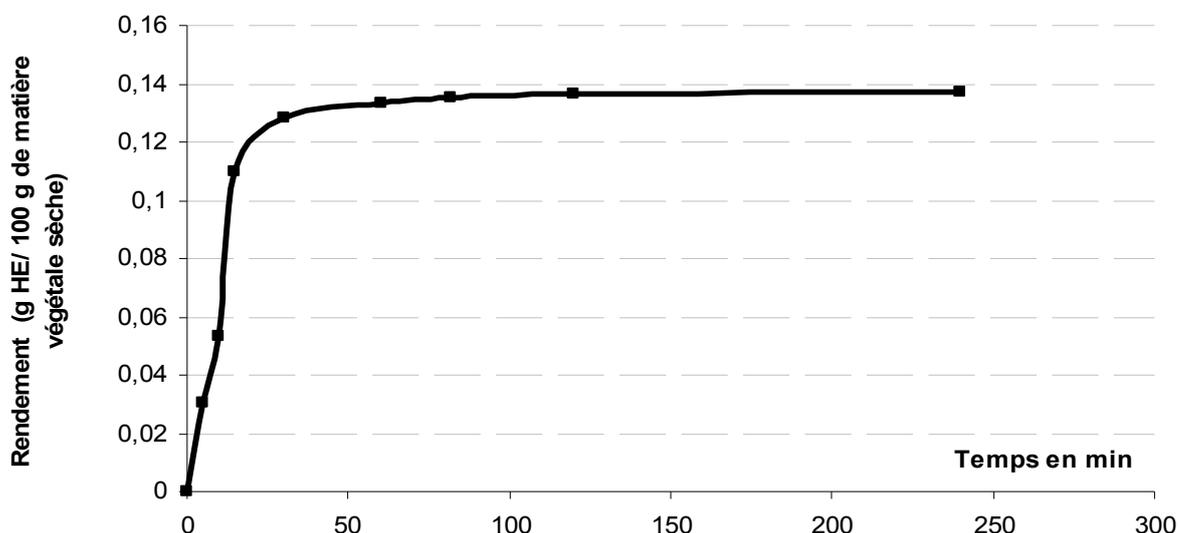
**Tableau III-3: Composition des huiles essentielles des feuilles d'*Arbutus unedo* L. d'Algérie et de Turquie**

| Composés                               | (%)                       |         |
|--|---------------------------|---------|
|  | Algérie                   | Turquie |
| Nonanal                                | 0.4                       | 3.7     |
| Linalool                               | 0.2                       | 1.2     |
| $\alpha$ -terpineol                    | 0.3                       | 8.8     |
| $\beta$ -cyclocytral                   | 0.2                       | 0.8     |
| (E)-2-decenal                          | 0.6                       | 12.0    |
| acide nonanoïque (acide pelargonique)  | 0.8                       | 3.9     |
| $\beta$ -caryophyllène                 | 0.1                       | 0.7     |
| (E)-geranyl acetone                    | 0.3                       | 3.8     |
| $\beta$ -ionone                        | 0.2                       | 3.4     |
| 2,6-di-tert-butyl-p-cresol             | 6.2                       | --      |
| acide dodécanoïque (laurique)          | 1.1                       | 1.6     |
| acide tétradécanoïque (myristique)     | 2.7                       | 2.3     |
| hexahydrofarnésyl acetone              | 0.8                       | 3.9     |
| acide hexadécanoïque (palmitique)      | 35.2                      | 5.1     |
| 9,12 acide octadécadiénoïque (oléique) | 18.8                      | --      |
| <b>RI : indice de rétention</b>        | <b>% surface relative</b> |         |

#### 4.1.2 Cinétique d'extraction

Dans les conditions optimales qui ont été déterminées précédemment, nous avons suivi la cinétique d'extraction de l'huile essentielle des feuilles de l'arbousier et nous avons déterminé le rendement en huile essentielle. Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure III-6.

Le rendement moyen, exprimé en g d'huile essentielle par 100 g de matière végétale sèche, est de 0,14 pour les feuilles d'arbousier. Ce rendement est obtenu après environ 1 heure 30 min d'extraction.



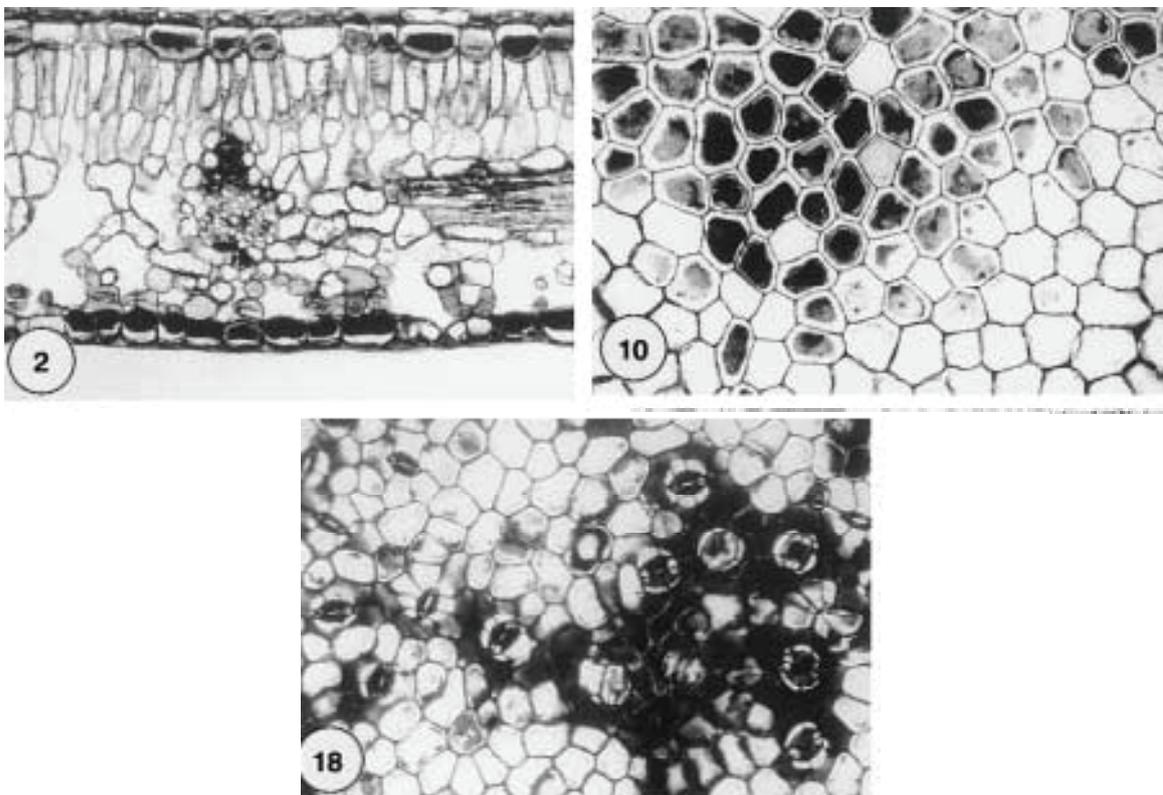
**Figure III-6** : Evolution du rendement en huile essentielle des feuilles d'*Arbutus unedo* L.

La courbe d'évolution du processus d'extraction de l'huile d'arbousier, dans le temps, montre deux parties :

- Une première partie qui correspond à une branche croissante représentant une augmentation rapide du rendement. Soit 95 % d'huile sont obtenus en 30 min.
- La seconde partie représente le temps à partir duquel le rendement en huile essentielle augmente très lentement pour atteindre un palier. Ce dernier correspond au moment pour lequel nous n'observons plus d'augmentation de la quantité d'huile dans le distillat. Il indique la fin du processus d'extraction.

De ces résultats, il apparaît que la cinétique d'extraction est plus rapide à son début car elle concerne les huiles essentielles facilement accessibles contenues dans les couches superficielles. En effet, la structure anatomique des feuilles d'arbousier (figure III-7) révèle que les produits terpéniques sont localisés directement dans les cellules

épidermiques [215–217]. L'arbousier ne présente pas de structures spécialisées pour le stockage de ces métabolites secondaires. Cette plante est qualifiée de « *nonstoring plants* » [218]. Les terpènes produits par la plante sont directement émis à l'extérieur de la cellule sécrétrice et se retrouvent dans le suc cellulaire. Le maximum d'émission des terpènes a lieu au printemps [218]. Ceci explique probablement le faible rendement en huile essentielle (0.14 %) des feuilles d'*Arbutus unedo* L. La littérature n'apporte pas d'information sur le rendement en huile essentielle de cette éricacée.



**Figure III-7 :** vues au photomicroscope de coupes anatomiques (x 170) au niveau des faces inférieure et supérieure de la feuille d'arbutus : les composés terpeniques sont représentés par les taches noires [217].

## 4.2 Les huiles essentielles de la bruyère arborescente

### 4.2.1 Composition chimique

La composition chimique de l'huile essentielle des feuilles d'*Erica arborea* L. est représentée par le profil chromatographique donné sur la figure III-8. Dans le tableau III-4 sont rapportés les 74 composés identifiés et les indices de retentions calculés. Ces composés représentent 97 % de l'huile essentielle d'*Erica*.

Selon nos résultats, l'huile essentielle des feuilles de la bruyère arborescente est caractérisée par une teneur élevée en acide palmitique (33.3 %), 9,12-Octadecadiénoïque acide (Z,Z)- (6.6 %), du phytol (6 %) et des hydrocarbures aliphatique comme l'heptacosane ( 5.7 % ) et nonacosane (6.1 %). En outre, d'autres composés sont identifiés mais avec des proportions faibles tels que  $\beta$ -Fenchyl alcohol,  $\beta$ -Bourbonene,  $\beta$ -Caryophyllene, l'eugénol, ionol, géranylacétone et germacrène D.

A notre connaissance et suite à notre recherche bibliographique, la composition chimique de l'huile essentielle d'*Erica arborea* L. n'a fait l'objet d'aucune étude. Cependant, il existe dans la littérature une abondante bibliographie sur l'isolement des composés non volatils de cette plante comme les flavonoïdes [202], Les glucosides phénylpropanoïdes [204,205] et les tanins condensés [206].

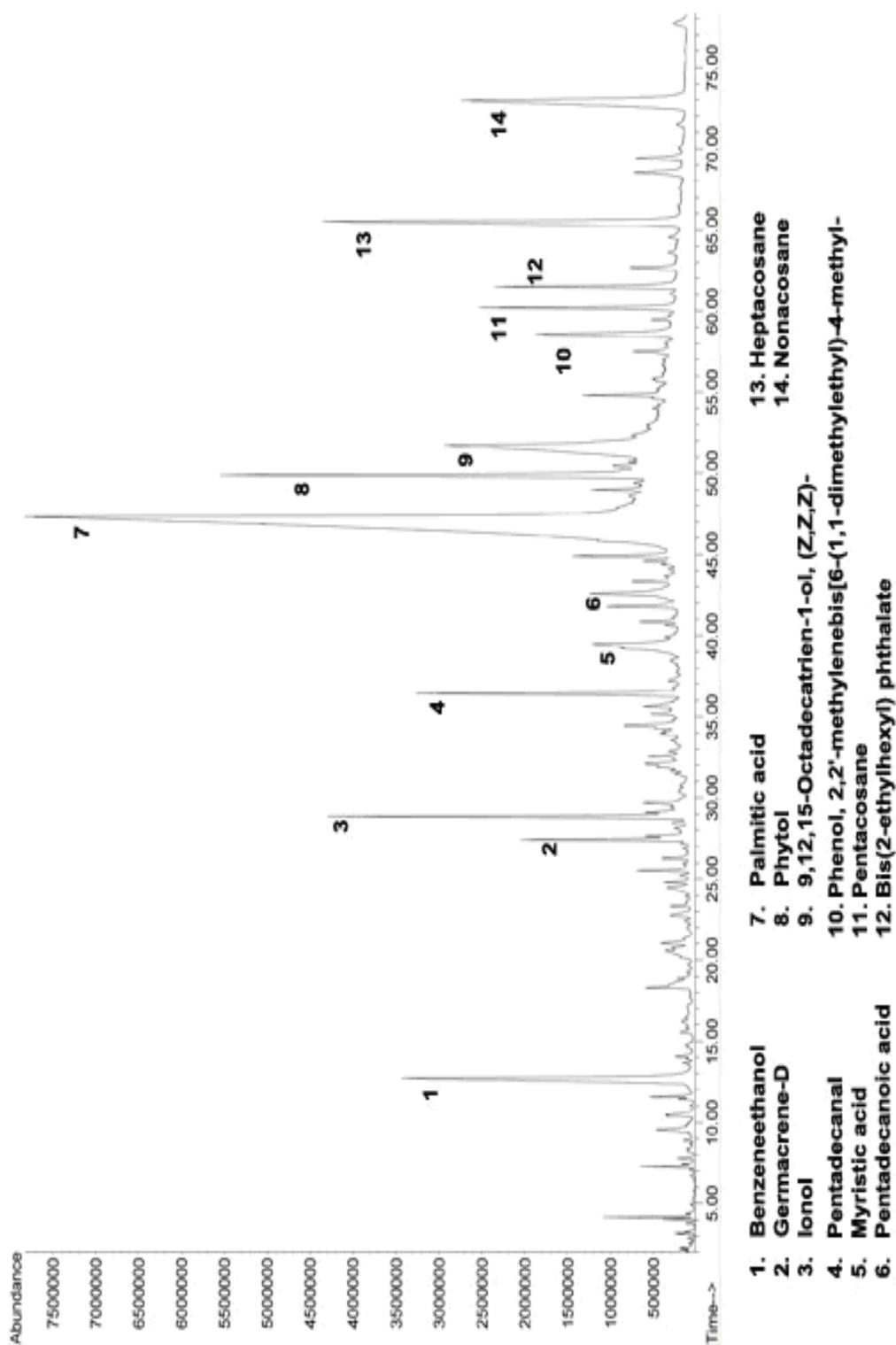


Figure III-8 : Profil chromatographique de l'huile essentielle des feuilles d'*Erica arborea* L

**Tableau III-4: Composition de l'huile essentielles des feuilles d' *Erica arborea* L.**

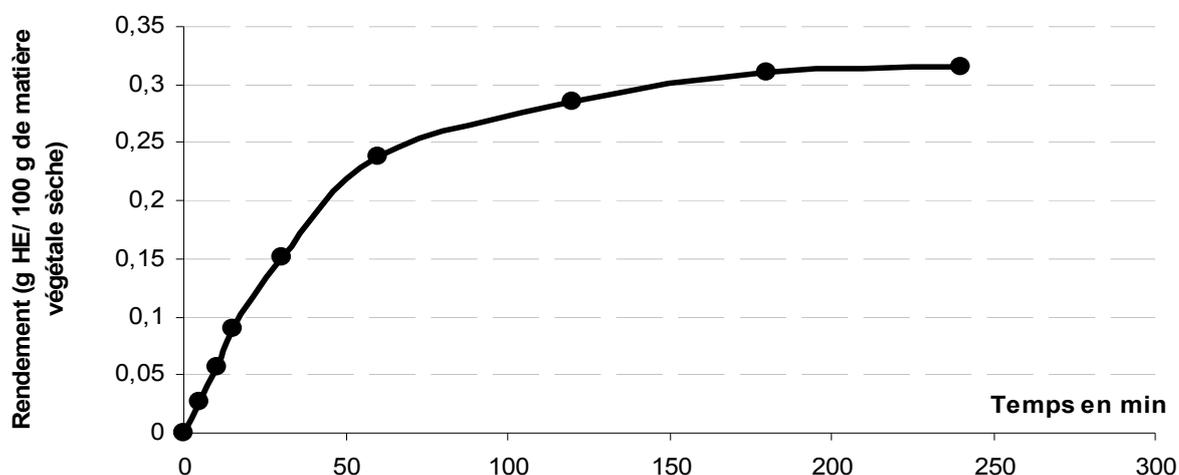
| Composés                       | RI          | %          | Composés   | RI          | %           |
|--------------------------------|-------------|------------|--|-------------|-------------|
| 2-Hexenal                      | 851         | 0,1        | Lauric acid  | 1569        | 0,6         |
| 3-Hexen-1-ol, (Z)-             | 858         | 0,4        | Tetradecanal   | 1580        | 0,4         |
| 1-Octen-3-ol                   | 968         | 0,3        | Valencene  | 1588        | 0,2         |
| Furan, 2-pentyl-               | 982         | 0,1        | Junipene   | 1615        | Tr          |
| 1-Hexanol, 2-ethyl-            | 1015        | Tr         | Bicyclo[4.4.0]dec-1-ene, 2-isopropyl-5-methyl-9-methylene- | 1625        | 0,2         |
| Benzyl alcohol                 | 1033        | 0,4        | Torreyol   | 1629        | 0,1         |
| 2-Decen-1-ol, (E)-             | 1056        | 0,1        | Methyl hydrojasmonate                                      | 1635        | 0,1         |
| 1-Octanol                      | 1058        | 0,2        | t-Muurolol   | 1639        | 0,7         |
| 1,2-Heptanediol                | 1084        | 0,1        | Cyclotetradecane   | 1659        | 0,3         |
| Nonanal                        | 1088        | 0,3        | Pentadecanal   | 1693        | 2,6         |
| <b>Phenethyl alcohol</b>       | <b>1116</b> | <b>5,1</b> | Myristic acid  | 1776        | 2,3         |
| 2,6-Nonadienal, (E,E)-         | 1138        | Tr         | Farnesol   | 1818        | 0,1         |
| $\beta$ -Fenchyl alcohol       | 1181        | 0,1        | Hexahydrofarnesyl acetone                                  | 1826        | 0,3         |
| Decanal                        | 1187        | Tr         | Phthalic acid  | 1853        | 0,7         |
| Caprylic acid                  | 1198        | 0,1        | Pentadecanoic acid   | 1877        | 1,6         |
| 2-Decenal, (E)-                | 1258        | 0,4        | Farnesyl acetone   | 1899        | 0,3         |
| Coumaran                       | 1263        | 0,4        | Isophytol  | 1944        | 0,1         |
| Nonanoic acid                  | 1316        | 0,6        | Cembrene   | 1954        | 0,3         |
| 2,4-Decadienal                 | 1318        | 0,2        | Dibutyl phthalate  | 1967        | 0,9         |
| 2-Methoxy-4-vinylphenol        | 1324        | 0,3        | <b>Palmitic acid,</b>                                      | <b>2026</b> | <b>33,3</b> |
| Eugenol                        | 1354        | 0,4        | Oleic Acid   | 2079        | Tr          |
| $\beta$ -Bourbonene            | 1364        | 0,1        | <b>Phytol</b>  | <b>2090</b> | <b>6,0</b>  |
| Capric acid                    | 1384        | 0,5        | <b>9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-</b>                    | <b>2169</b> | <b>6,6</b>  |
| $\beta$ -Caryophyllene         | 1390        | 0,2        | Tricosane  | 2243        | 0,7         |
| $\beta$ -Cubebene              | 1397        | 0,1        | Tetracosane  | 2291        | 0,4         |
| 3,4-didehydro- $\beta$ -ionone | 1404        | 0,5        | p-Cresol, 2,2'-methylenebis[6-tert butyl-                  | 2315        | 2,1         |
| cis-Geranylacetone             | 1423        | 0,3        | Z-12-Pentacosene   | 2339        | 0,2         |
| $\alpha$ -amorphene            | 1446        | Tr         | Pentacosane  | 2360        | 1,9         |
| Germacrene-D                   | 1451        | 1,4        | Bis(2-ethylhexyl) phthalate                                | 2395        | 1,9         |
| trans- $\beta$ -Ionone         | 1457        | 0,5        | Hexacosane   | 2600        | 0,5         |
| $\alpha$ -Muurolene            | 1470        | 0,2        | <b>Heptacosane</b>   | <b>2700</b> | <b>5,7</b>  |

|                          |             |            |                   |             |            |
|--------------------------|-------------|------------|-------------------|-------------|------------|
| $\alpha$ -Farnesene      | 1478        | 0,1        | Octacosane        | 2800        | 0,8        |
| <b>Ionol</b>             | <b>1488</b> | <b>3,1</b> | Squalene          | 2847        | 0,7        |
| $\delta$ -Cadinene       | 1494        | 0,4        | <b>Nonacosane</b> | <b>2900</b> | <b>6,1</b> |
| dihydroactindiolide      | 1508        | 0,4        |                   |             |            |
| Caryophyllene oxide      | 1553        | 0,1        |                   |             |            |
| Isoaromadendrene epoxide | 1558        | 0,1        |                   |             |            |
|                          |             |            | Total (%)         |             | 96,3       |

Tr : trace (< 0.1%), %: surface relative, RI: Indice de rétention

#### 4.2.2 Cinétique d'extraction

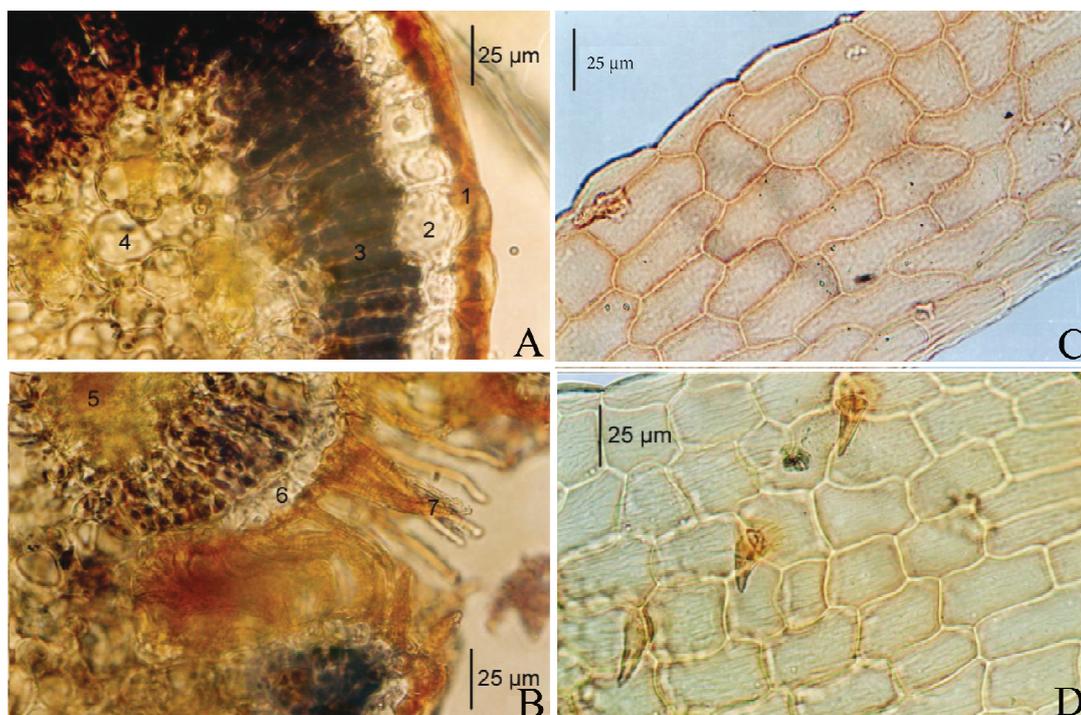
La figure III-9 montre l'évolution du rendement en huile essentielle des feuilles d'*Erica arborea L.* en fonction du temps d'extraction. Le rendement moyen en huile essentielle des feuilles d'*Erica* est de 0.31 g de HE / 100 g de matière végétale sèche. Ce rendement est obtenu après 3 heures d'extraction par hydrodistillation.



**Figure III-9 :** Evolution du rendement en huile essentielle des feuilles d'*Erica arborea L.*

L'examen de la courbe cinétique d'extraction de l'huile essentielle de la bruyère, fait ressortir l'existence de deux étapes cinétiques. Pendant la première étape, la courbe

montre une évolution rapide, ce qui correspond à l'extraction rapide de l'huile se trouvant dans les zones superficielles de la matrice végétale. 50 % de l'huile sont extraits en 30 min. Pendant la seconde étape, la courbe cinétique montre une évolution lente jusqu'à atteindre un palier au bout de 180 min, correspondant à l'épuisement de l'huile.



**Figure III-10** : Vues au microscope de coupes anatomiques de feuille d'*E. arborea* L. 1- cuticule, 2 – épiderme supérieur, 3 - parenchyme palissadique, 4 - parenchyme spongieux, 5 - faisceau vasculaire, 6 – épiderme inférieur, 7 - trichomes glandulaires / (A et B) limbe de la feuille / (C) épiderme inférieur / (D) épiderme supérieur [219].

Comme pour l'arbousier, la bruyère arborescente est qualifiée de « *nonstoring plants* » [218] ; elle ne présente aucune structure de stockage d'huiles essentielles [219,220]. En effet, la structure anatomique des feuilles d'*Erica* (figure III-10) montre la présence de trichomes non glandulaires qui n'assurent aucun rôle de stockage des produits du métabolisme secondaire.

---

---

**CHAPITRE 4**

**Intégration des énergies renouvelables dans le procédé  
d'extraction**

---

---

Le chapitre 4 concerne le potentiel d'intégration des énergies renouvelables dans le procédé d'extraction des huiles essentielles par hydrodistillation. Il s'agira dans cette partie de l'étude, d'utiliser la biomasse (résidus solides de distillation des huiles essentielles) comme combustible pour la production de vapeur.

L'activité industrielle de la filière des plantes aromatiques et médicinales génère des milliers de tonnes de déchets qui sont déversés à la mer, ou sont laissés pourrir au soleil. L'amoncellement de ces déchets va laisser s'infiltrer dans le sol des constituants organiques qui seront emportés par le lessivage des eaux de pluie provoquant la pollution de la nappe phréatique [118]. Néanmoins, le potentiel énergétique de ces déchets est intéressant et leur intégration, comme intrants énergétiques dans des procédés industriels présentent des enjeux économiques et environnementaux considérables.

Pour mesurer cette valeur, nous avons dimensionné et réalisé un brûleur à biomasse équipé d'un dispositif de production de vapeur. Des expérimentations de combustion pour la production de vapeur ont été réalisées. La vapeur générée a servi à l'extraction de l'huile essentielle d'arbusier. Les résultats obtenus en termes de rendement et de temps d'extraction ont été comparés à ceux obtenus par la méthode utilisant un chauffage électrique.

## **1. Maîtrise de la consommation d'énergie lors de l'hydrodistillation**

Avant d'alimenter un procédé d'hydrodistillation à l'aide des énergies renouvelables, il est pertinent, dans un premier temps, de déterminer la consommation d'énergie réelle liée à ce procédé. Ce diagnostic, consistant en la mesure des flux énergétiques, va nous permettre de faire un état des lieux et de définir des pistes d'actions à mettre en œuvre.

Pour réaliser ce diagnostic, nous avons effectué à l'échelle laboratoire, une série de manipulations afin de mesurer l'énergie consommée en fonction des différentes puissances utilisées et d'évaluer les pertes.

## 1.1 Conditions expérimentales

L'extraction par le procédé d'hydrodistillation a été suivie au laboratoire. Le système utilisé se compose d'un chauffe- ballon électrique d'une puissance nominale de 500 W, d'un ballon en verre d'une capacité de 02 litres servant d'extracteur et d'un réfrigérant droit de Liebig pour la condensation de vapeur. Nous avons suivi l'évolution du débit de vapeur en fonction des différentes puissances de chauffage ; ces dernières ont été mesurées par un analyseur de puissance de haute précision (0,1%), (ZIMMER LMG 450). L'erreur expérimentale pour l'ensemble des essais a été déterminée statistiquement sur la base de 05 essais répétitifs. Elle est estimée comme étant le plus grand écart par rapport à la moyenne des essais.

## 1.2 Résultats et discussions

### 1.2.1 Calcul des pertes de puissance

Dans le tableau IV-1 sont consignés les différentes puissances ( $P_{EL}$ ) du chauffe-ballon, le temps ( $t$ ) nécessaire pour la production de 25 mL de vapeur et l'énergie électrique  $E_{EL}$  qui correspond à l'énergie consommée lors de la production des 25 mL de vapeur. Cette énergie électrique est engendrée par la puissance électrique consommée du chauffe-ballon appliquée pendant un temps  $t$ .

**Tableau IV-1 : Paramètres expérimentaux**

| $P_{EL}$ (W) | $t_1$ (min) | $t_2$ (min) | $E_{EL}$ (Wh) |
|--------------|-------------|-------------|---------------|
| 130          | 50,00       | 11          | 131,08        |
| 215          | 39,00       | 7           | 164,36        |
| 268          | 35,00       | 6           | 182,09        |
| 319          | 31,00       | 5           | 190,34        |
| 380          | 24,00       | 4           | 175,01        |
| 416          | 19,00       | 3           | 149,18        |

Avec

- **P<sub>EL</sub> (W)** : Puissance délivrée du chauffe-ballon
- **T<sub>0</sub>** : Température initiale de l'eau = 25 °C
- **t<sub>1</sub> (min)** : Temps nécessaire pour le chauffage de l'eau de T<sub>0</sub> à T<sub>e</sub>
- **t<sub>2</sub> (min)** : Temps nécessaire pour la production de 25 mL de vapeur
- **Me (kg) = 1,2** : Masse d'eau initiale dans le ballon
- **m<sub>v</sub> (kg) = 0,025** : Quantité de vapeur produite :

Le transfert d'énergie électrique en une énergie calorifique se réalise avec un certain rendement dû aux pertes par effet joule. Ces dernières sont évaluées à partir des différents flux de chaleur qui correspondent à :

**Q<sub>1</sub>** : est la quantité de chaleur absorbée par un corps soumis à une élévation de température sans changement d'état, calculée par la formule suivante :

$$Q_1 = Me \times C_p \times (T_e - T_0) \quad (\text{IV-1})$$

**Avec :**

**C<sub>p</sub>** : capacité thermique moyenne massique de l'eau = 4,180 kJ / kg. °C

**Q<sub>2</sub>** : est la quantité de chaleur nécessaire pour la vaporisation de l'eau à 100°C, calculée par la formule suivante :

$$Q_2 = m_v \times \Delta H_v \quad (\text{IV-2})$$

**Avec :**

**ΔH<sub>VAP</sub>** = 2257 kJ/kg

Ainsi le flux d'énergie thermique total est :

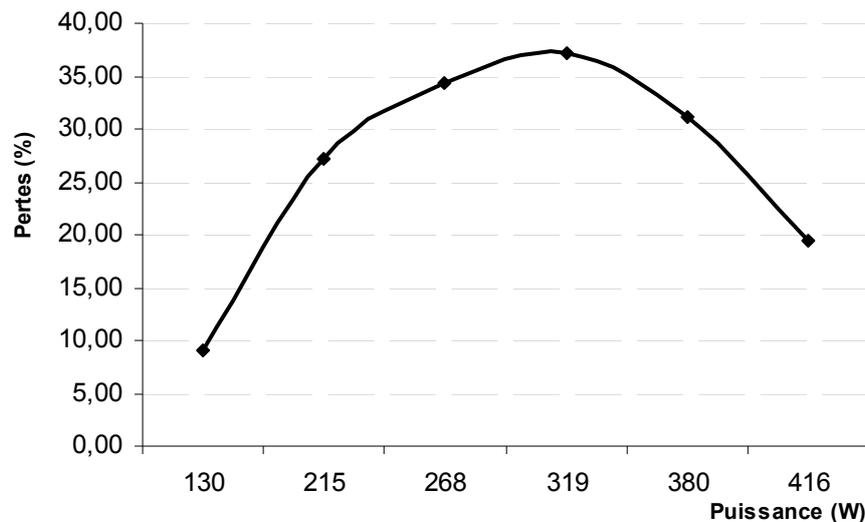
$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (\text{IV-3})$$

De ce flux nous pouvons déduire les différentes puissances utiles du système de chauffage et les différentes pertes thermiques induites par effet joule et par le non

calorifugeage du dispositif. La capacité calorifique de l'équipement n'est pas prise en compte dans les différents calculs des flux de chaleur.

La représentation graphique des pertes de puissance (figure IV-1) montre une courbe gaussienne qui passe par un maximum puis décroît pour les deux dernières puissances (380 et 416 W). Ces résultats sont attribués à la vitesse d'écoulement de la vapeur qui devient relativement importante avec l'augmentation de la puissance de chauffe, induisant ainsi un temps de passage réduit de sorte que les échanges thermiques se trouvent minimisés.

De ces résultats, il paraît énergétiquement plus intéressant de travailler avec les puissances extrêmes, domaines où les pertes sont minimales.

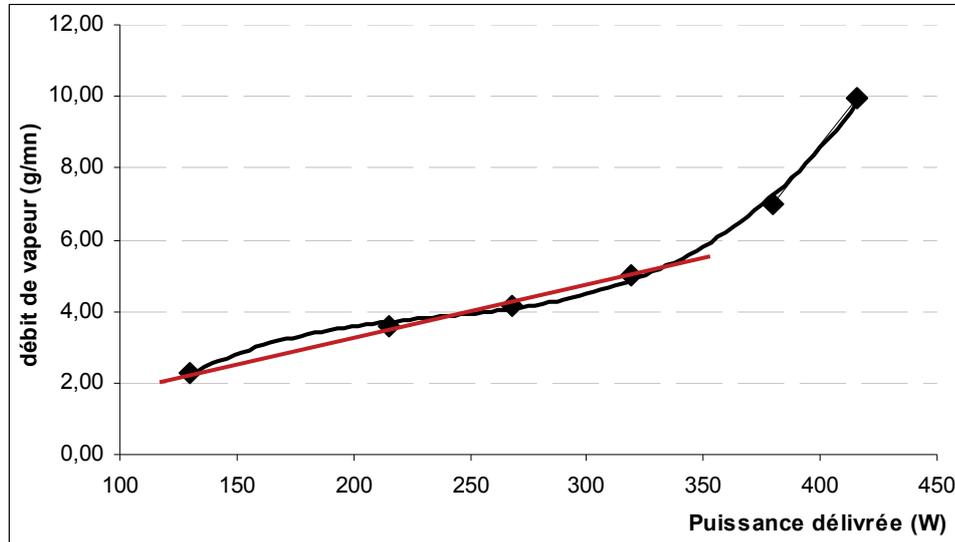


**Figure IV-1** : Evolution des pertes de puissance

### 1.2.2 Débit de vapeur et apport énergétique

Le système considéré fonctionne à pression atmosphérique. La figure IV-2 donne l'évolution du débit de vapeur en fonction des différentes puissances délivrées du chauffe-ballon. L'examen de cette courbe montre que la fonction - débit de vapeur en fonction des différentes puissances- n'est pas linéaire.; mais il existe un domaine où

celle-ci peut être considérée comme linéaire. Le débit de vapeur augmente avec la puissance de chauffage.



**Figure IV-2 :** Evolution du débit de vapeur en fonction des puissances de chauffage

## 2. Evaluation de la quantité de vapeur générée par la biomasse

Pour la mesure de la quantité de vapeur générée par la combustion de la biomasse, nous avons dimensionné et réalisé un brûleur à biomasse équipé d'un dispositif de production de vapeur.

### 2.1 Dimensionnement, conception et réalisation d'un brûleur à biomasse

Un brûleur à biomasse a été conçu et réalisé dans le laboratoire bioénergie et Environnement du Centre de Développement des Energies Renouvelables. Ce brûleur s'apparente à un poêle-cheminée à foyer fermé et modifié pour répondre à nos besoins. Il est constitué d'un foyer, d'un avaloir et d'un conduit de fumée.

#### ▪ le foyer

L'âtre ou foyer correspond à la chambre où a lieu la combustion. Il est fermé par une porte frontale qui permet un contrôle de la combustion.

**▪ L'avaloir**

L'avaloir, appelé aussi chambre à fumée est une hotte venant coiffer le foyer. L'avaloir sert d'intermédiaire entre le feu et le conduit. Il reçoit les fumées et les gaz de combustion qu'il canalise vers le conduit de fumées. La base de l'avaloir doit couvrir le nuage de fumée en respectant une certaine hauteur. En cas de hauteur trop élevée il risque d'y avoir refoulement de fumées. En cas de hauteur faible, le débit des gaz étant moindre et la température plus élevée, le tirage devient trop important. L'inclinaison de l'avaloir, par rapport à l'horizontale, ne doit pas être inférieure à 60°.

**▪ le conduit de fumée**

Un conduit de fumée permet le transport de gaz de combustion à partir du générateur jusqu'au milieu extérieur où ils seront dispersés. Les gaz de combustion s'élèvent du fait que leur température est supérieure à la température ambiante et au fur et à mesure de leur refroidissement, l'efficacité de la convection diminue. Il est donc important que le trajet des gaz soit le plus direct possible.

**2.1.1 Dimensionnement du brûleur**

Le brûleur à biomasse a été dimensionné sur la base d'une règle de calcul empirique. Cette dernière est fondée sur les règles de similitude appliquées en mécanique des fluides et s'exprime comme suit [221,222] :

- La profondeur  $P_d$ , la hauteur  $H$  et la largeur  $\ell$  du foyer doivent être dans le rapport 4, 5,6
- La hauteur de l'avaloir doit être identique à celle du foyer
- La hauteur du conduit doit être égale à au moins 14 fois la hauteur du foyer
- L'ouverture du foyer doit être équivalente à 9 fois celle du conduit

La section minimale du conduit de fumée pour un foyer fermée est de 250 cm<sup>2</sup> et partant de cette section nous obtenons les différentes cotations du brûleur à biomasse (Tableau IV-2).

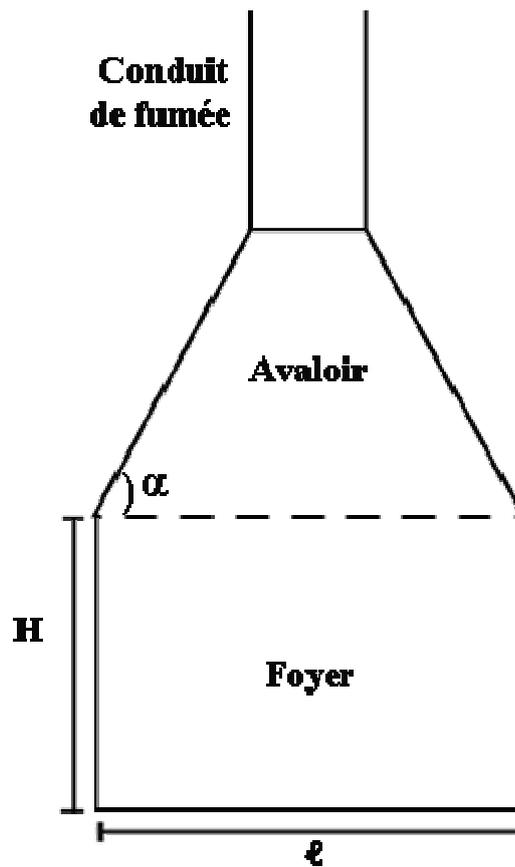


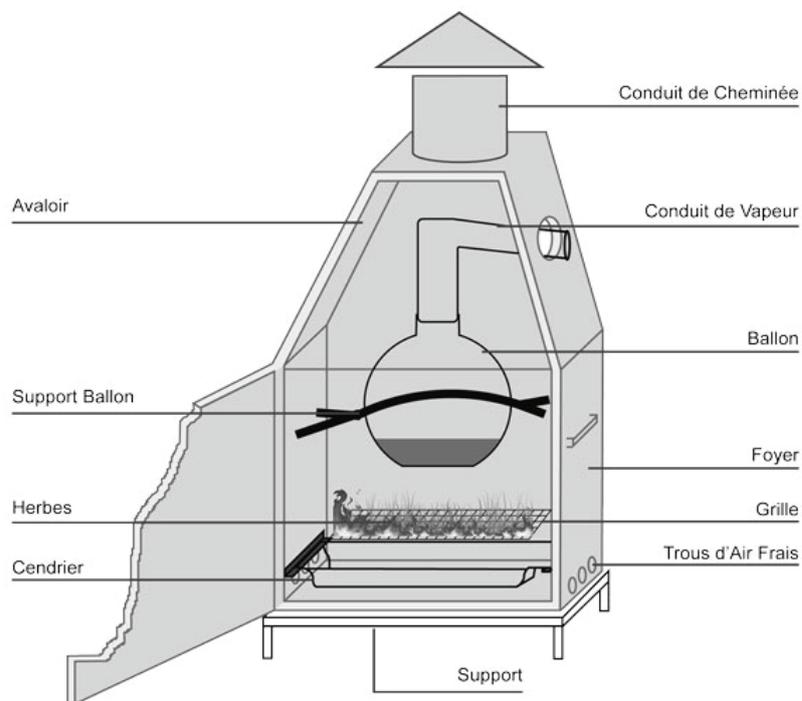
Figure IV-3 : Vue en plan du Brûleur à Biomasse

Tableau IV-2: dimension du brûleur à biomasse

|                                      |                                |                      |
|--------------------------------------|--------------------------------|----------------------|
| Section conduit de fumée(circulaire) | Section minimale               | 250 cm <sup>2</sup>  |
| Ouverture du foyer                   | $\ell \times H = 9 \times 250$ | 2250 cm <sup>2</sup> |
| Hauteur du foyer                     | $H = \ell \times 5/6$          | 43.30 cm             |
| Largeur du foyer                     | $\ell = H \times 6/5$          | 51.96 cm             |
| Profondeur du foyer                  | $P_d = H \times 5/4$           | 34.64 cm             |
| Angle d'inclinaison de l'avaloir     | Tangente $\alpha$              | 68 °                 |

Les arrivées d'air constituent un paramètre très important pour le bon fonctionnement du brûleur à biomasse. L'installation d'une arrivée d'air frais va fournir l'oxygène nécessaire à la combustion.

Au niveau du brûleur conçu, l'air destiné à la combustion directe est admis par des orifices situés à la base du foyer tout au tour des parois. La surface totale est de  $150 \text{ cm}^2$ . Un Cendrier à tiroir a été incorporé au niveau du foyer pour la récupération des cendres.



**Figure IV-4** : Vue en perspective du Brûleur à biomasse

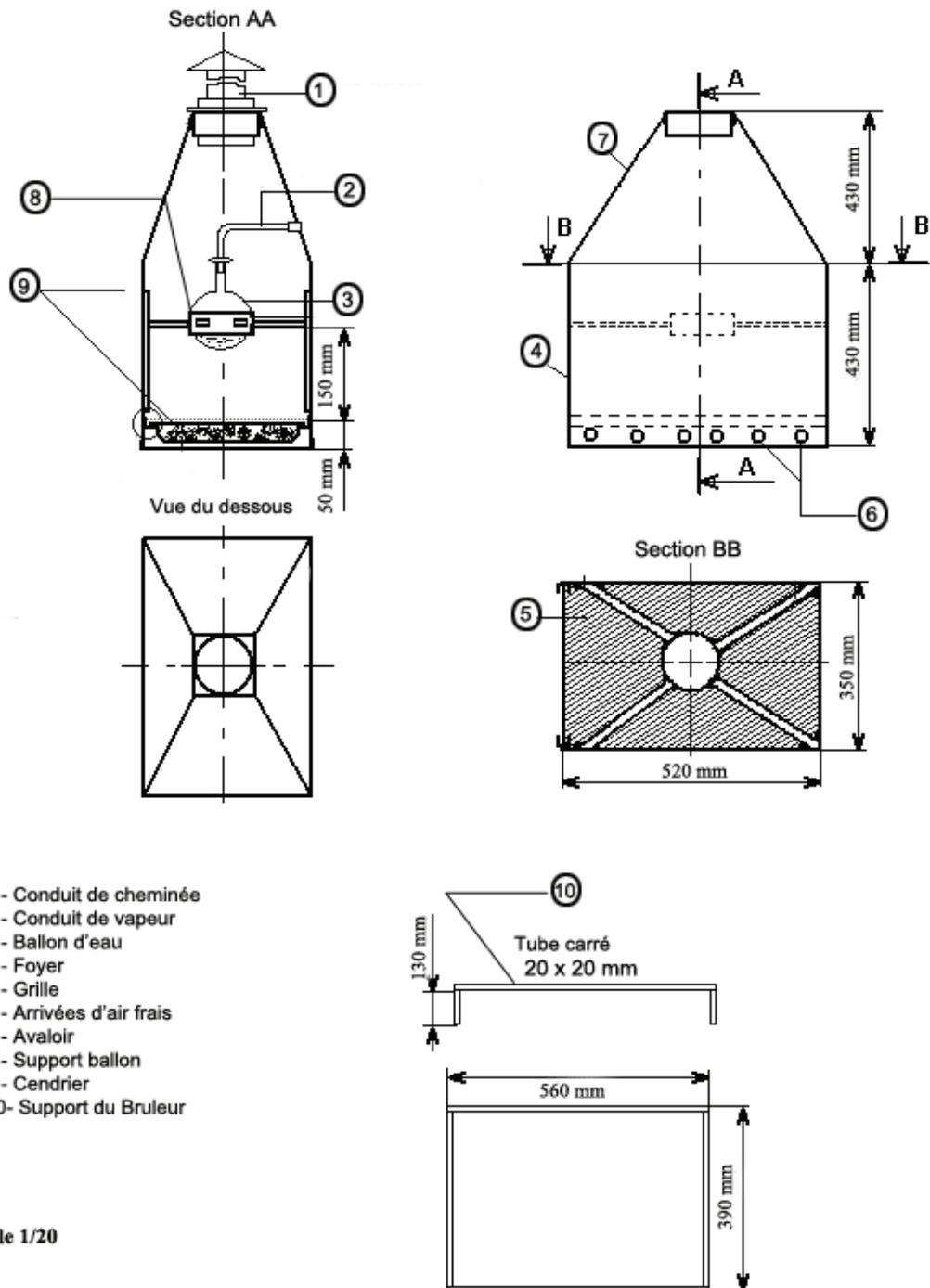


Figure IV-5 : Dimensionnement du brûleur à Biomasse

### 2.1.2 Réalisation du brûleur

La structure du brûleur à biomasse est en acier galvanisé de 2 mm d'épaisseur. Les transferts de chaleurs sont minimisés au maximum en assurant l'isolation thermique des différentes parties du brûleur.

De la laine de verre est placée sur une épaisseur de 25 mm entre une tôle galvanisée et une plaque de stratifié de 5 mm d'épaisseur. Cette organisation rappelle celle des panneaux sandwich. La plaque de stratifié haute pression utilisé est composé de feuilles de papier kraft superposées imprégnées de résine phénolique qui sous l'effet de la pression (100 bars) et de la température (160 à 180 °C), polymérisent et durcissent. L'ensemble constitue un seul bloc homogène dont les propriétés physiques sont proches d'un bois très dur. Nous obtenons ainsi, un panneau de 32 mm d'épaisseur recouvert sur ses deux faces d'une fine couche de résine synthétique. Les différentes faces du brûleur sont jointes par des profilés en cornière.

Pour répondre à nos besoins de production de vapeur d'eau, nous avons mis en place à l'intérieur du foyer un système de production de vapeur d'eau composé de :

- un ballon d'eau chaude
- un système de fixation du ballon
- un circuit de conduit de vapeur

Le ballon, d'une capacité de deux litres est en verre capable de résister à de fortes températures. Il est placé dans le foyer à 05 cm de la grille sur laquelle est entretenue la combustion de la biomasse. Le ballon est maintenu dans le foyer par un support composé d'un anneau central fixé aux parois du foyer par 4 branches. L'ensemble du support est débité dans du fer plat.

## 2.2 Mesure de la quantité de vapeur générée par la biomasse

Les résidus issus de l'extraction des huiles essentielles présentent une valeur énergétique intéressante et peuvent à ce titre être utilisés en tant que combustible pour la production de vapeur. Afin de mesurer cette valeur, des expérimentations de combustion ont été réalisées dans le brûleur à biomasse conçu à cet effet.

La combustion peut être caractérisée comme une réaction chimique irréversible fortement exothermique entre un combustible et un comburant (ou oxydant) selon le schéma global :



Les produits de combustion correspondent aux gaz brûlés ou fumées. La chaleur ou énergie calorifique issue de cette réaction va servir, dans notre cas, à produire de la vapeur d'eau pour les besoins du procédé d'extraction. Des mesures portant sur le débit de vapeur et la quantité d'énergie consommée sont venues compléter nos résultats dans la détermination de l'efficacité énergétique de la biomasse dans les procédés d'extraction.

### 2.2.1 Conditions expérimentales

Un échantillon  $f = 415\text{g}$  des parties aériennes d'Arbousier, issues de l'extraction des huiles essentielle par hydrodistillation, a été utilisé comme combustible dans le générateur de vapeur à biomasse. La chaleur dégagée par la combustion du matériel végétal a permis de générer de la vapeur à partir d'une quantité d'eau de masse  $M_e = 1200\text{ g}$  prise à une température initiale de  $60^\circ\text{C}$ .

Le Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS) des feuilles d'arbousier est de  $20.87\text{ kJ / g}$  [223,224]. Le PCS est défini comme étant la quantité totale de chaleur dégagée par la combustion complète de l'unité de poids de cet échantillon. Il est dit « supérieur » lorsque la combustion est effectuée à volume constant et que l'eau formée au cours de la combustion est condensée (la chaleur latente de vaporisation de l'eau est incluse dans la valeur du PCS).

Le tableau IV-3 ci après, résume les différents paramètres expérimentaux mesurés lors de cette étude.

**Tableau IV-3 : Paramètres expérimentaux mesurés**

|                                     |       |        |
|-------------------------------------|-------|--------|
| Quantité de biomasse utilisée       | $f$   | 415 g  |
| Masse d'eau dans le ballon          | $M_e$ | 1200 g |
| Température initiale de l'eau       | $T_0$ | 60 °C  |
| Quantité de vapeur produite         | $m_v$ | 165 g  |
| Temps de combustion                 | $t_c$ | 20 mn  |
| Température de production de vapeur | $T_e$ | 100 °C |

### 2.2.2 Résultats et discussion

La quantité maximale de chaleur qui peut être produite par la combustion de l'échantillon  $f$  est donnée par la formule suivante :

$$Q_b(kJ) = f.PCS = 8661kJ \quad (IV-4)$$

La vapeur produite lors de cette expérience présente un débit moyen de 8.25 g/min. La puissance  $P_B$  délivrée par le générateur de vapeur à biomasse est de :

$$\text{Puissance (kW)} = \text{Energie (kJ)} / \text{Durée(s)}$$

$$P_B = Q_b / t_c$$

$$P_B = 7217 \text{ W}$$

Théoriquement la quantité de chaleur nécessaire pour la production de vapeur d'eau à 100 °C peut être calculée comme suit :

$$\Delta H_{vap} = 2500 \text{ kJ/Kg et}$$

$$C_p = 4.185 \text{ kJ/Kg}^\circ\text{C:}$$

$$Q = [Me C_p (T_e - T_0) + m_v \Delta H_{vap}] = 613.38 \text{ kJ} \quad (\text{IV-5})$$

$$Q = 613.38 \text{ kJ}$$

A partir de  $Q_b$  et  $Q$  nous déterminons la quantité de chaleur utilisée réellement pour la production de vapeur. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\beta = \frac{Q}{Q_b} = 7 \% \quad (\text{IV-6})$$

Ce résultat montre que seulement 7 % de la chaleur susceptible d'être produite par la biomasse ont été utilisés pour la production de vapeur.

Le graphe de la Figure IV-2 a permis de déterminer la puissance électrique  $P_{EL}$  qui produirait un débit de vapeur de 8,25 g / min, obtenu dans le brûleur à biomasse. Cette puissance  $P_{EL}$  a été estimée à 396,2 W.

### 2.3 Efficacité énergétique du brûleur

Comme indicateur de l'efficacité énergétique du brûleur à biomasse, nous avons comparé la puissance totale générée par la combustion de la biomasse à la puissance électrique donnant le même débit de vapeur.

$$\eta(\%) = 100 \frac{P_{EL}}{P_B} = 5.5 \% \quad (\text{IV-7})$$

Notons qu'on s'est placé dans le cas le plus extrême en ne tenant pas compte de la capacité calorifique du système (brûleur à biomasse) dans l'ensemble des calculs effectués.

L'efficacité énergétique du brûleur peut être améliorée en utilisant un économiseur de chaleur de cheminée. Un économiseur est un échangeur de chaleur entre l'air et un liquide, conçu pour utiliser la chaleur des gaz de combustion chauds d'une chaudière pour préchauffer le liquide.

#### 2.4 Potentiel d'intégration de la biomasse dans le procédé d'extraction

L'intégration des déchets solides comme source d'énergie renouvelable pour la production de vapeur, dans un procédé d'extraction d'huile essentielle nécessite d'établir une relation entre les besoins énergétiques du procédé et l'énergie générée par la combustion de la biomasse.

La production de vapeur avec un débit massique  $\dot{m}$  (kg / h), à une température  $T_e$  de l'eau prise à une température  $T_0$  nécessite une puissance  $P$ , donnée par la relation suivante:

$$P = 1/3600 \left[ m_v c_p (T_e - T_0) + m_v \Delta H_{vap} + m_v c_{ps} (T_s - T_{eb}) \right] \quad (IV-8)$$

L'extraction des huiles essentielles par distillation à la vapeur est généralement effectuée à la pression atmosphérique avec une vapeur saturée, dans les conditions suivantes:

$T_0 = 10^\circ \text{C}$  : température de l'eau

$T_e = 100^\circ \text{C}$

$T_s = T_{eb} = 100^\circ \text{C}$  (température de vapeur saturée à pression atmosphérique)

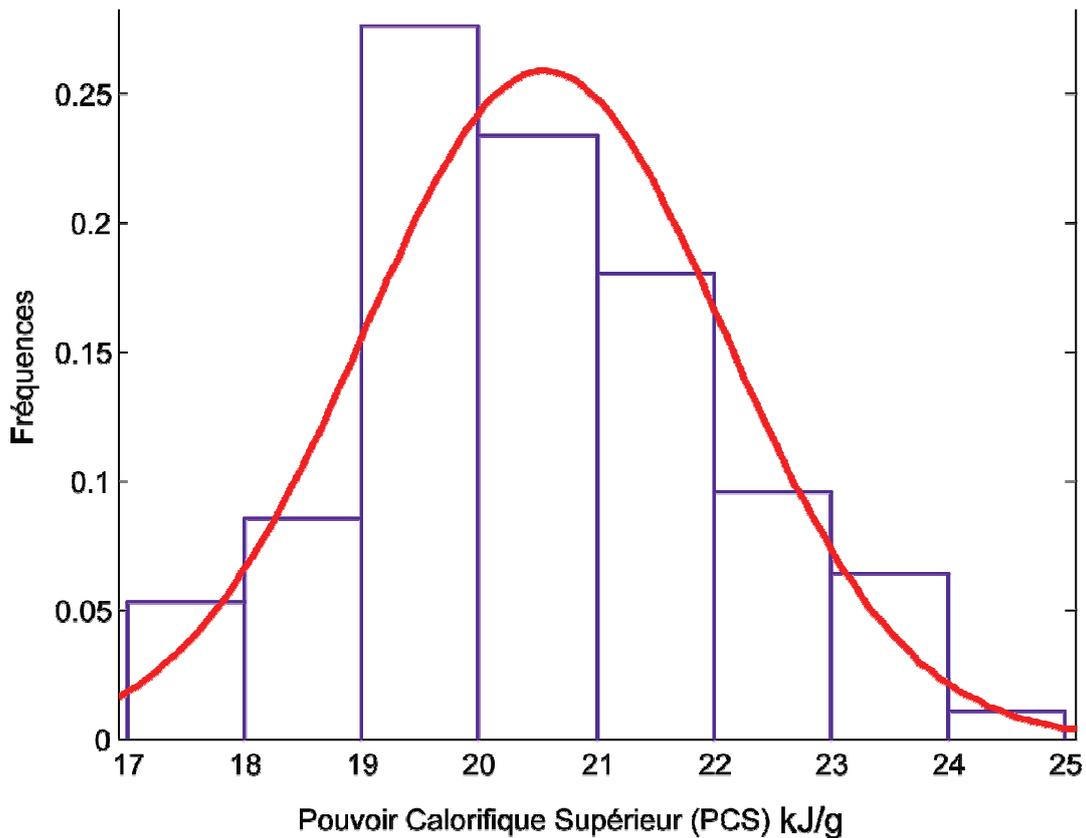
$\Delta H_{vap} = 2500 \text{ kJ / kg}$  et  $C_p = 4,185 \text{ kJ / kg }^\circ \text{C}$ ,

La relation (IV-8) devient:

$$P (\text{kW}) = 0.8 m_v (\text{kg/h}) \quad (IV-9)$$

La production d'huiles essentielles génère des résidus solides de distillation. Ces résidus sont formés de matières organiques combustibles qui peuvent être utilisées comme source d'énergie, en particulier pour la production de vapeur nécessaire à l'extraction des huiles essentielles [225].

Par ailleurs, plusieurs études ont portées sur l'évaluation du pouvoir calorifique des espèces aromatiques de différentes régions [223,224,226]. Les valeurs du pouvoir calorifique de 96 espèces ont été recensées dans ces travaux. Les résultats montrent que les valeurs des PCS de ces espèces aromatiques sont comprises entre 17 et 25 kJ/g. La valeur moyenne du pouvoir calorifique des 96 espèces recensées est de 20.55 kJ / g (Figure IV-6) ; valeur que nous arrondissons à 21 kJ/g dans les calculs qui vont suivre.



**Figure IV-6** : Détermination du PCS moyen de 96 plantes

Soit  $F$  (kg / h), représente la masse de matériel végétal transformé par heure d'extraction. Le rendement en huile essentielle à partir d'un matériel végétal varie de 1 à 3 % en poids [80,107,118]. Ainsi en fin d'extraction, on récupère un déchet solide ayant pratiquement, après séchage, la même masse que le matériel introduit. Ces déchets solides peuvent fournir une puissance  $P_B$  donnée par l'équation suivante :

$$P_B (kW) = 21000 F (kg/h) / 3600 = 5.8 F (kg/h) \quad (IV-10)$$

La puissance fournie par la combustion de la biomasse peut suffire pour produire la vapeur nécessaire à l'extraction, si les conditions d'exploitation répondent à l'équation suivante:

$$\beta \times P_B \geq P \Rightarrow F (kg/h) \geq \frac{0.14 \dot{m} (kg/h)}{\beta} \quad (IV-11)$$

Où  $\beta$  est la fraction de la puissance utilisée dans la production de vapeur. Cette valeur est évaluée expérimentalement à 7 %.

Ainsi, les conditions de l'équation (IV-11) deviennent:

$$F (kg/h) \geq 2 \dot{m} (kg/h) \Rightarrow \dot{m} (kg/h) \leq 0.5 F (kg/h) \quad (IV-12)$$

Les études sur la cinétique d'extraction des huiles essentielles ont montré que les durées de traitement ne dépassent pas 1 heure pour les plantes à sites sécréteurs exogènes [80,227] et 3 heures pour les plantes à sites sécréteurs endogènes [80,228].

Le débit de vapeur (masse vapeur / masse de substrat végétal / heure) généralement utilisé dans le processus de distillation à la vapeur est compris entre 0,01 et 0,4 kg / kg.h. [229,230].

Considérant un temps d'extraction moyen de 2 heures, le générateur de vapeur à biomasse utilisant les déchets solides du processus d'extraction peut fournir un débit de

vapeur relatif de 0,25 kg / kg.h. Cette valeur répond aux conditions d'extraction les plus exigeantes en termes de débit de vapeur.

Ce résultat montre que la combustion de matière végétale rejetée par une production d'huile essentielle est en mesure de fournir la chaleur nécessaire au processus d'extraction.

### **2.5 Coût, énergie et impact environnemental**

La réduction du coût d'extraction de l'huile essentielle d'arbousier en utilisant la biomasse comme combustible, est mise en évidence en termes de temps requis et d'énergie consommée. Dans le cas d'une hydrodistillation en utilisant l'énergie électrique pour la production de vapeur, la consommation énergétique est de 600 kWh.kg<sup>-1</sup> d'huile essentielle produite. Cette consommation se répercute directement sur l'impact environnemental du procédé. En effet, pour obtenir 1 kWh d'électricité, il faut brûler soit du gaz naturel, soit du pétrole ou du charbon, et il en résulte en moyenne un dégagement de 0.713 kg de CO<sub>2</sub> [231]. Aussi, le procédé d'extraction conventionnel dégage 427 kg de CO<sub>2</sub>. kg<sup>-1</sup> d'huile essentielle dans l'atmosphère, alors que le procédé par la biomasse présente un bilan carbone neutre [232–234]. Le CO<sub>2</sub> rejeté dans l'atmosphère lors de la combustion a été capté par la plante lors de sa croissance. La chlorophylle des plantes capture l'énergie solaire en transformant le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) contenu dans l'air et l'eau du sol, en hydrates de carbone, mélanges complexes constitués de carbone, d'hydrogène et d'oxygène.

### **Conclusion**

Un procédé d'extraction par hydrodistillation en utilisant de la biomasse et l'énergie conventionnelle comme source de chaleur a été appliqué pour l'extraction de l'huile essentielle d'*Arbutus unedo* L.

Les résultats obtenus dans cette partie de l'étude, montrent que ce serait intéressant d'utiliser des résidus de biomasse pour la production de vapeur dans des procédés d'extraction. Ceci peut apporter une contribution majeure à l'amélioration de l'efficacité

énergétique de ces procédés ; la combustion est bien souvent le moyen le plus économique pour générer de la chaleur [235–237].

Sur le plan environnemental, La valorisation énergétique de la biomasse par procédé de conversion thermique est une réponse aux pollutions causées par le surplus de coproduits agricoles et forestiers. Le déchet est ainsi transformé en combustible.

Pour un bilan rigoureux, il est utile de réaliser une Analyse du Cycle de Vie (ACV) des deux variantes, électrique et biomasse. L'ACV est un outil normalisé (ISO 14040 et 14044) qui a pour objectif d'évaluer les impacts environnementaux potentiels d'un produit, d'un procédé, d'un système ou d'un service en considérant toutes les étapes de son cycle de vie, de l'extraction des ressources naturelles, en passant par la conception et l'usage du produit, jusqu'à sa fin de vie [238].

---

---

## **CHAPITRE 5**

### **Cinétiques d'extraction et modélisation énergétique**

---

---

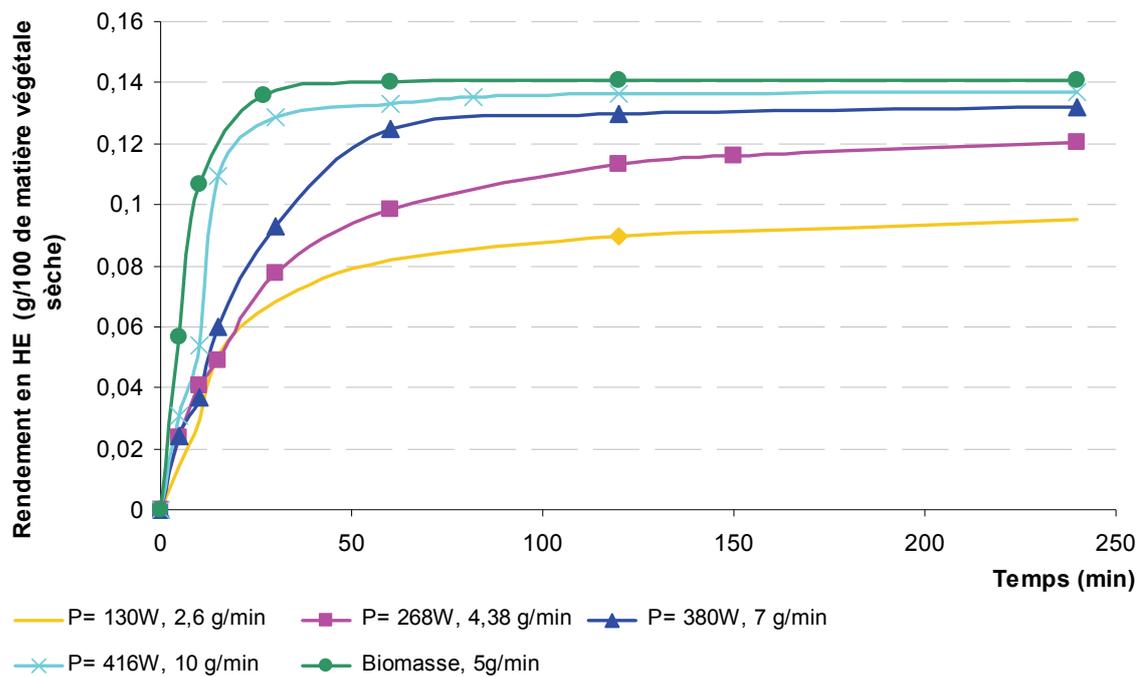
Dans ce chapitre nous présentons dans un premier temps, une comparaison entre les évolutions du rendement en huiles essentielles en fonction du temps pour le procédé d'extraction en utilisant la biomasse en tant que source énergétique et le procédé d'hydrodistillation classique. Dans un deuxième temps et dans le cadre d'une meilleure compréhension des phénomènes mis en jeu lors de l'extraction de l'huile essentielle d'arbousier par hydrodistillation, nous proposons d'étudier la modélisation des mécanismes de transfert de matière de la phase solide vers la phase liquide. Cette étape de modélisation mathématique peut fournir les éléments et les règles d'extrapolation pour le passage de l'échelle laboratoire à l'échelle industrielle.

## **1. Cinétiques d'extraction des huiles essentielles**

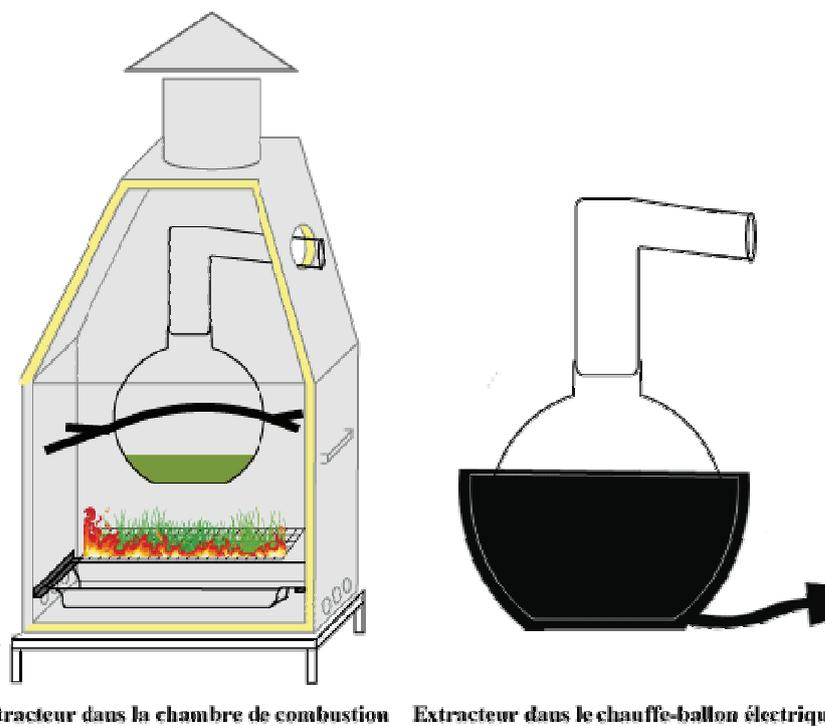
### **1.1 Cinétique d'extraction à différents débits de vapeur**

Les courbes de la figure V-1 montrent la variation du rendement d'extraction en fonction du temps pour différents débits de vapeur dans le cas du chauffage électrique : 2,6 g/min, 4,38 g/min, 7 g/min et 10 g/min et un débit de 5 g/min dans le cas d'un chauffage à la biomasse. Ces courbes révèlent que le temps d'extraction est beaucoup plus important lorsque le débit de vapeur d'eau diminue. D'un point de vue vitesse de distillation, les cinétiques sont plus courtes à des débits de vapeur importants dans le cas du chauffage électrique.

Le meilleur taux d'extraction est obtenu à un débit de 10g/min dans le cas du chauffage électrique. Par contre, dans le cas du chauffage à la biomasse bien que le débit de vapeur soit de 5 g/min le rendement est meilleur par rapport au chauffage électrique. En effet, dans le cas de l'extraction d'huile en utilisant la biomasse comme combustible, l'extracteur - contenant la matière première et l'eau - est placé dans la chambre de combustion (foyer) du brûleur où la température dépasse les 160°C (la température des fumées mesurée est de 160°C). Dans ces conditions de température, toute l'enceinte est enveloppée par les fumées de la combustion du matériel végétal et l'augmentation de la température dans la chambre de combustion est uniforme et rapide. Dans le cas de l'extraction conventionnelle, l'extracteur est soumis, dans sa partie supérieure, à la température ambiante (Figure V-2).



**Figure V-1 :** Cinétiques d'extraction à différents débits de vapeur et pour différentes puissances de chauffe



**Figure V-2 :** L'extracteur dans les cas du chauffage électrique et du chauffage à la biomasse

La variation du rendement d'extraction en fonction du débit de vapeur a été signalée dans le cas d'une extraction par hydrodistillation des huiles essentielles des fruits du genévrier (*Juniperus communis* L.) [239] et des feuilles de thym (*Thymbra spicata*) [240]. Les mêmes résultats ont été obtenus pour d'autres procédés d'extraction par micro-ondes [241] et par l'extraction par eau subcritique [242].

## **1.2 Evolution du rendement en fonction de l'apport énergétique**

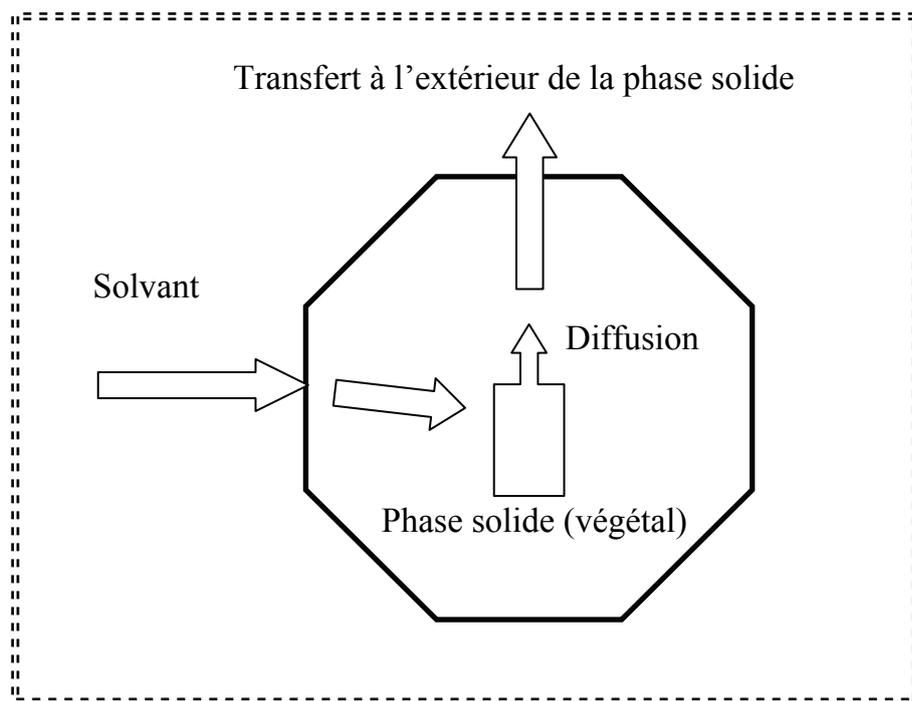
L'évolution du rendement d'extraction en fonction du temps à différentes puissances de chauffage (chauffage électrique et par la biomasse) est montrée sur les graphes de la figure V-1. Pendant la première étape, les courbes montent rapidement, pour l'ensemble des puissances. Durant cette phase, la vitesse d'extraction est beaucoup plus prononcée pour les grandes puissances. Pendant la seconde étape la courbe cinétique change de pente, correspondant au passage vers un processus plus lent. Cette étape s'achève avec un palier correspondant au taux d'extraction maximal.

## **2. Modélisation des données cinétiques**

### **2.1 Compréhension de l'extraction solide-liquide**

L'extraction solide-liquide est une opération de transfert ou d'échange de matière entre une phase solide, qui contient la matière à extraire et une phase liquide, le solvant d'extraction [243]. Le transfert de matière est la résultante de différents processus élémentaires résumés sur la figure V-3:

- pénétration du solvant dans la matrice solide,
- libération du soluté dans le solvant,
- diffusion de la solution enrichie vers l'extérieur de la particule,
- transfert de la solution enrichie dans tout l'environnement.



**Figure V-3** : Schéma du transfert de matière lors de l'extraction des huiles essentielles par hydrodistillation

La pénétration du solvant dans le solide est généralement rapide par rapport aux autres processus. Cette étape peut donc être négligée dans la cinétique globale. La diffusion de la solution enrichie vers la surface extérieure du solide joue un rôle également important dans la cinétique de transfert de matière. La vitesse globale d'extraction devra prendre en compte les diverses vitesses de diffusion dans le solide. Le passage de la solution riche vers la masse de solvant est une opération de transfert à l'interface solide-liquide. Une bonne agitation permet de réduire considérablement la résistance aux transferts en phase liquide pour représenter l'étape limitante [243–245].

La vitesse de transfert, mesurée par le flux de matière transférée par unité de temps et par unité de surface d'interface, dépend directement des écarts par rapport l'équilibre, appelés potentiels d'échange [244,245].

## 2.2 Les modèles mathématiques

### 2.2.1 Les modèles à une constante de temps

Plusieurs modèles mathématiques sur le processus d'hydrodistillation ont été rapportés dans la littérature. Certains auteurs supposent que les huiles essentielles sont réparties uniformément dans le substrat végétal et proposent ainsi des modèles de cinétique de premier ordre [239,240,246,247].

**Spiro et Kandiah (1989)**, ont proposé un simple modèle cinétique de premier ordre pour simuler l'extraction de l'huile essentielle de gingembre [248].

**Cassel et Vargas (2006)**, ont modélisé l'extraction de l'huile essentielle de *Cymbopogon winterianus* par entraînement à la vapeur, à l'aide d'un modèle diffusionnel basé sur la loi de Fick [246]. Le modèle diffusionnel a été appliqué sur des données expérimentales obtenues au laboratoire et à l'échelle industrielle.

Ce modèle a également été utilisé pour simuler les données d'extraction des huiles essentielles du romarin, du basilic et de la lavande [249].

**Milojević et al (2008)**, ont proposé un modèle décrivant les cinétiques d'extraction de l'huile essentielle des baies de genévrier [230]. En absence de réaction chimique, le processus de transfert de matière peut être décrit par la seconde loi de Fick comme suit:

$$\frac{\partial R_p}{\partial t} = D_{eff} \frac{\delta^2 R_p}{\delta x^2} \quad (V-1)$$

Où

$R_p$  : étant la concentration moyenne de l'huile essentielle dans les particules végétales à un temps  $t$ ,

$x$  : la distance le long de la direction de diffusion,

$D_{eff}$  : Le coefficient de diffusion effectif.

Des hypothèses simplificatrices ont été émises pour permettre la résolution de l'équation (V-1) :

- Les particules végétales sont isotropes, de même taille et forme et contiennent la même quantité d'huile essentielle initialement ;
- L'huile essentielle est considérée comme étant un pseudo composé ;
- Une partie de l'huile essentielle est localisée sur la surface externe des baies cassées et le reste est uniformément distribué dans les particules végétales ;
- Le coefficient de diffusion effectif est constant ;
- La concentration de l'huile essentielle présente sur la surface des baies est nulle en tout moment du processus de distillation à cause de son lavage instantané de la surface ;
- Absence de résistance au transfert de matière depuis les surfaces externes des particules végétales.

L'intégration de l'équation (V-1) en prenant en compte les conditions aux limites donne l'expression suivante :

$$\frac{R_\infty - R}{R_\infty} = B e^{-k t} \quad (V-3)$$

Où

$R$  : le rendement en huile à un temps  $t$ ,

$R_\infty$  : le rendement maximal en huile pouvant être obtenu ;

$B$  : constante ;

k : constante cinétique comprenant le coefficient de diffusion effectif.

Le développement du modèle mathématique, décrivant la cinétique d'extraction de l'huile essentielle à partir des baies de genévrier, est basé sur un mécanisme similaire à celui de l'extraction par solvant. Selon ce mécanisme, la distillation de l'huile de genévrier est constituée de deux étapes successives :

- Lavage rapide de l'huile superficielle : Dans cette étape l'huile essentielle est lavée depuis les surfaces externes des particules végétales durant une courte période d'hydrodistillation (théoriquement à  $t=0$ );
- Diffusion lente de l'huile interne: Dans cette étape l'huile essentielle diffuse lentement depuis l'intérieur des particules végétales vers leurs surfaces externes.

La 1ère étape est caractérisée par une augmentation rapide du rendement en huile au tout début du processus,

La seconde étape est caractérisée par une augmentation exponentielle lente du rendement en huile avec la progression d'hydrodistillation.

L'équation décrivant la cinétique de l'extraction de l'huile essentielle est la suivante :

$$\frac{R_{\infty} - R}{R_{\infty}} = (1 - b) e^{-k t} \quad (\text{V-3})$$

Les hypothèses suivantes ont été émises pour établir le bilan massique de l'huile du genévrier dans l'appareil d'hydrodistillation :

- La pression et la température sont constantes dans l'appareil d'hydrodistillation ;
- La condensation de la vapeur se produit uniquement dans le condenseur ;
- L'eau de distillation est saturée par les composés hydrosolubles de l'huile du genévrier ;

- La masse d'eau (vapeur ou liquide) contenue dans le condenseur, dans les tubes de connexion et dans le séparateur est négligeable devant la masse d'eau contenue dans le ballon d'extraction ;
- La suspension dans le ballon est parfaitement mélangée ;
- L'écoulement de la phase vapeur à travers le ballon, les tubes de connexion et le condenseur ainsi que l'écoulement de l'eau condensée à travers le condenseur, le séparateur et les tubes de connexion est considéré comme écoulement piston.

Le modèle proposé est un modèle à deux paramètres, où le 1er paramètre,  $b$  caractérise l'étape d'extraction rapide de l'huile, et le 2ème,  $k$ , caractérise l'étape d'extraction lente de l'huile. La forme linéaire de l'équation (V-3) est la suivante :

$$\ln \left( \frac{R_{\infty} - R}{R_{\infty}} \right) = \ln(1 - b) - k t \quad (\text{V-4})$$

### 2.2.2 Les modèles à plus d'une constante de temps

Des modèles plus complexes de second ordre ont été publiés [250–252]. Ces modèles signifient que l'extraction se fait en deux processus simultanés. La quantité d'huile extraite augmente rapidement avec le temps, au début, puis diminue lentement jusqu'à la fin du processus d'extraction.

**Benyoussef et al (2002)**, ont étudié l'hydrodistillation de l'huile essentielle de coriandre et ont proposé un modèle de transfert de matière qui fait état d'une étape de libération du soluté avant le processus de diffusion. D'après ces auteurs, il s'agirait d'un transfert de matière avec réaction chimique ce qui conduirait à deux termes dans l'équation du modèle à deux constantes [252].

Les équations aux dérivées partielles, traduisant les bilans de matière, ont été intégrées numériquement et les résultats obtenus ont montré une meilleure simulation par cette approche que dans le cas d'un processus purement diffusionnel. De plus dans leur

approche, ces auteurs ont admis un coefficient de diffusion variable avec la concentration du soluté dans la matrice végétale [252].

**Sovová et Aleksovski (2006)**, ont élaboré un modèle selon lequel on peut distinguer deux types de cellules végétales, cassées et intactes, au sein des particules solides. Les cellules cassées par le prétraitement mécanique sont localisées près de la surface des particules, tandis que le noyau des particules contient des cellules intactes.

En conséquence, on peut postuler l'existence de deux étapes ; Au début, l'extraction est relativement rapide à partir des cellules cassées, suivie par une extraction plus lente à partir des cellules intactes, essentiellement contrôlée par les phénomènes de diffusion dans la phase solide. Le modèle mathématique est résolu analytiquement ; deux constantes de temps sont à déterminer [251].

**Cerpa et al. (2008)**, ont élaboré un modèle phénoménologique considérant trois étapes dans le processus d'obtention de l'huile. Les données expérimentales obtenues pour le lavandin ont été utilisées pour corréler les paramètres du modèle [253].

## 2.3 Modélisation des cinétiques d'extraction de l'huile essentielle

### d'*Arbutus unedo* L.

#### 2.3.1 Cinétiques d'extraction

Dans un objectif de compréhension des mécanismes mis en jeu, nous avons confronté les résultats des cinétiques d'extraction de l'huile essentielle d'arbousier en fonction de la puissance et la source de chauffage (électrique et biomasse) , au modèle théorique de premier ordre. L'équation du modèle est représentée par l'expression suivante :

$$R(t) = R_{\infty} (1 - B \times \exp(-kt)) \quad (V-5)$$

Pour alléger l'écriture on a noté  $B=1-b$

Les valeurs des paramètres empiriques B et k (tableau V-1) ont été déterminées par confrontation aux résultats expérimentaux utilisant la méthode des moindres carrés. Les coefficients de corrélation obtenus sont de 0.974 – 0.995.

**Tableau V-1 : Paramètres du modèle du premier ordre**

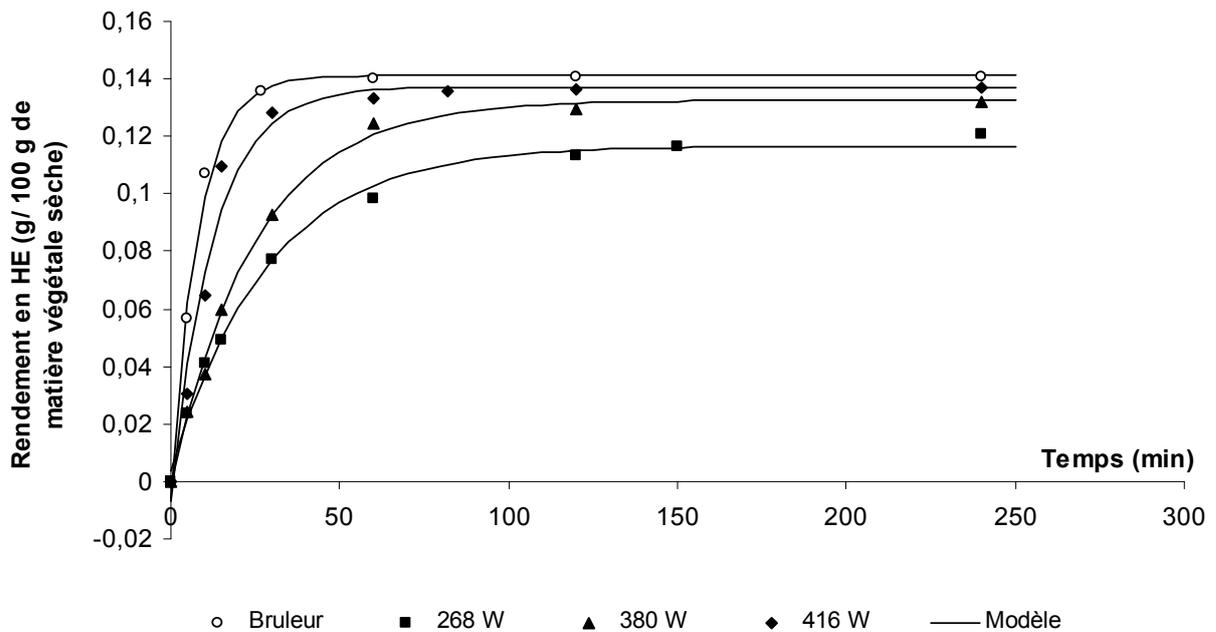
| Puissances      | $R_{\infty}$ | B      | k       | $R^2$ |
|-----------------|--------------|--------|---------|-------|
| <b>130 W</b>    | 0,09198      | 1,017  | 0,04468 | 0,991 |
| <b>268 W</b>    | 0,1167       | 0,9683 | 0,03477 | 0,995 |
| <b>380 W</b>    | 0,1326       | 1,011  | 0,04022 | 0,996 |
| <b>416 W</b>    | 0,1372       | 1,049  | 0,08082 | 0,974 |
| <b>Biomasse</b> | 0,1411       | 1,014  | 0,1241  | 0,993 |

Nous constatons que la valeur du paramètre B est voisine de 1. Elle est indépendante des conditions opératoires.

Le rendement  $R_{\infty}$  varie en fonction des puissances de chauffage. La différence observée pour ce paramètre est due à l'équilibre solide-liquide qui se déplace selon les conditions opératoires. Pour la biomasse, malgré une faible efficacité du générateur de vapeur, le rendement  $R_{\infty}$  est meilleur. Ceci est dû, éventuellement à la température de 160°C qui règne à l'intérieur du générateur et qui risque de surchauffer la vapeur.

La figure V-3 présente l'évolution des rendements d'extraction en fonction du temps pour différentes puissances de chauffage et les courbes simulées correspondantes. Nous constatons une bonne concordance entre les points expérimentaux et les résultats de simulation pendant toute la durée d'extraction. Le modèle de premier ordre décrit donc, correctement le processus d'extraction. Ces résultats concordent avec les observations faisant état de deux étapes lors de l'étude de la cinétique d'extraction.

En effet, la cinétique d'extraction est rapide au début du processus du fait qu'elle concerne l'extraction des huiles essentielles contenues dans les couches superficielles, facilement accessibles.



**Figure V-3** : Application du modèle mathématique à la cinétique d'extraction pour différentes puissances de chauffage

### 2.3.2 Détermination des vitesses d'extraction

En définissant la vitesse d'extraction de l'huile essentielle comme étant la dérivée du rendement. Cette vitesse s'exprime alors, comme suit :

$$\frac{dR}{dt} = v \quad (\text{V-6})$$

Les résultats de la modélisation de la cinétique d'extraction montre que le modèle du premier ordre donné par l'équation (V-5) représente bien l'évolution du rendement en

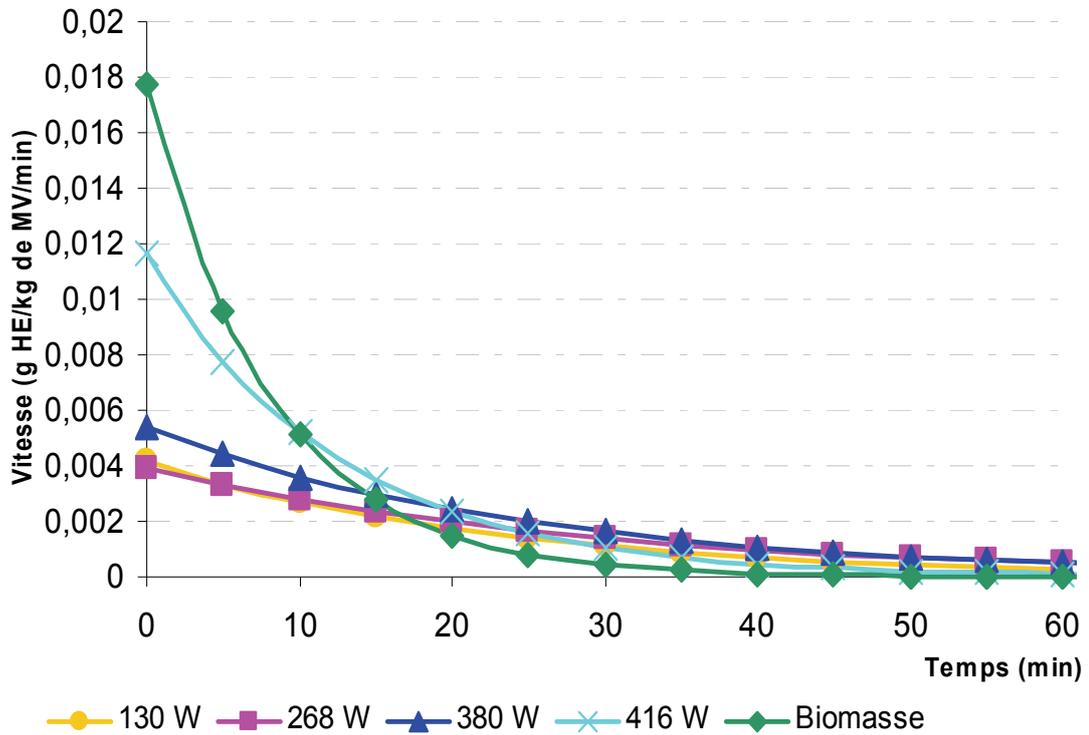
fonction du temps. Alors, l'évolution de la vitesse d'extraction sera décrite par la relation suivante :

$$v(t) = R_{\infty} \times B \times k \exp(-kt) \quad (V-7)$$

Les résultats simulés de la vitesse d'extraction de l'huile essentielle d'arbousier pour différentes puissances de chauffage (électrique et dans le cas de la biomasse) sont représentés sur les graphes de la figure V-4. Il ressort clairement de ces résultats que les vitesses d'extraction augmentent avec la puissance de chauffage. En effet, l'augmentation de la puissance entraîne une augmentation du débit de vapeur d'eau qui aurait pour effet une augmentation de la vitesse d'écoulement de la phase vapeur.

Nous constatons aussi, que les vitesses d'extraction sont plus élevées pendant les 15 premières minutes puis elles commencent à diminuer en fonction du temps traduisant ainsi le passage vers un processus d'extraction plus lent.

Notons que toutes les courbes vitesses sont asymptotiques à l'axe des abscisses et prennent une valeur quasiment nulle à partir d'une heure de traitement. Il faut remarquer que la courbe vitesse obtenue en utilisant comme source d'énergie le brûleur à biomasse, donne une vitesse initiale nettement plus élevée que celles obtenues avec un chauffage électrique. Cette vitesse diminue rapidement pour s'annuler après 40 min d'extraction. Ce résultat très intéressant, de notre point de vue, offre l'avantage de réduire la durée d'extraction qui est un indicateur en faveur d'une productivité si on venait à transposer ce procédé à l'échelle industrielle.



**Figure V-4** : Vitesse d'extraction de l'huile essentielle d'arbousier en fonction du temps et pour différentes puissances de chauffage

### 2.3.3 Modélisation énergétique

Afin de suivre l'évolution de la consommation énergétique le long du processus d'extraction de l'huile essentielle d'arbousier par hydrodistillation, on a imaginé dans un premier temps d'exprimer cette consommation comme étant la quantité d'énergie par gramme d'huile essentielle produite. Ce qui peut traduire alors une efficacité énergétique. Si ce paramètre est faible le processus tend vers une bonne efficacité et l'inverse si la valeur de ce paramètre augmente.

Des résultats obtenus plus haut, nous avons trouvé que la vitesse d'extraction augmente avec la puissance de chauffage ou bien l'apport énergétique. A partir de là, nous avons cherché une relation à partir de l'analyse de la puissance et de la vitesse d'extraction .

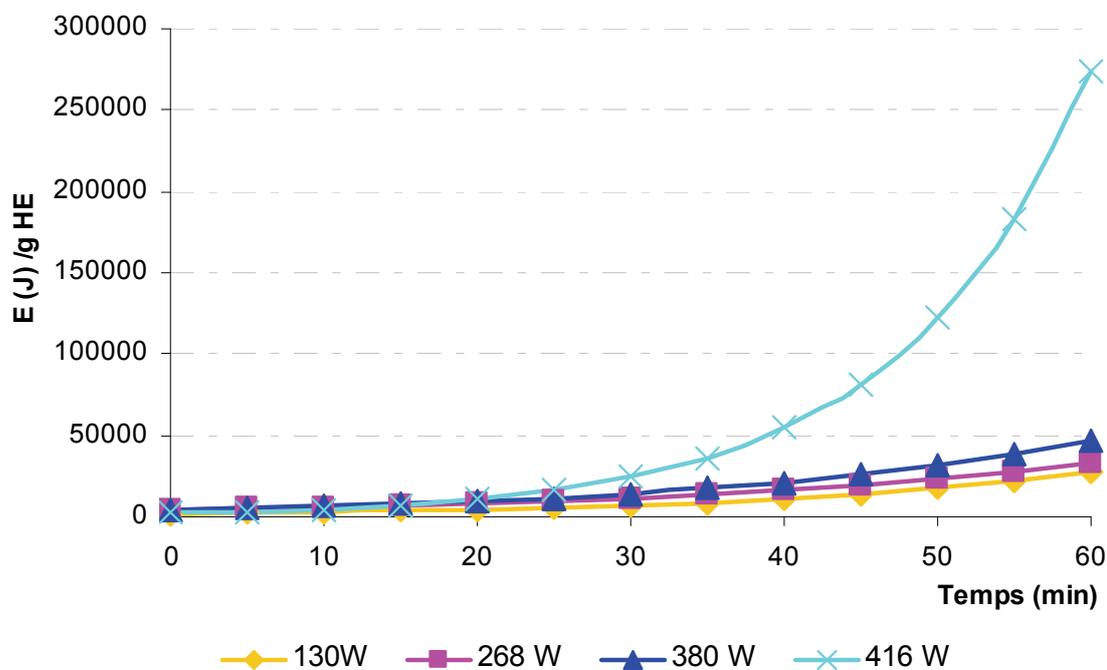
Etant donné que la puissance représente l'énergie consommée par unité de temps et la vitesse d'extraction traduit la masse d'huile récupérée par unité de temps et rapportée à la masse de matière végétale utilisée, nous pouvons écrire :

$$\frac{P}{v} = \frac{\text{énergie consommée /unité de t}}{\text{masse d'huile récupérée /unité de t /unité de masse de matière végétale}} \quad (\text{V-8})$$

Alors le rapport  $P/v$  représente l'énergie consommée par unité de masse d'huile essentielle produite :

$$\frac{P}{v} = \frac{P}{dR/dt} = \frac{P e^{k t}}{R_{\infty} B k} \quad (\text{V-9})$$

La variation du rapport  $P/v$  avec le temps, suit une loi exponentielle comme le montrent les graphes de la figure V-5.



**Figure V-5** : Consommation énergétique par gramme d'huile essentielle d'arbousier produit, en fonction du temps

Notons que l'étude de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle d'arbousier révèle que les rendements en huile essentielle après 30 minutes d'extraction sont de 95 %, 70 % et 64 % des rendement à l'équilibre pour des puissances de 416 W, 380 W et 268 W respectivement.

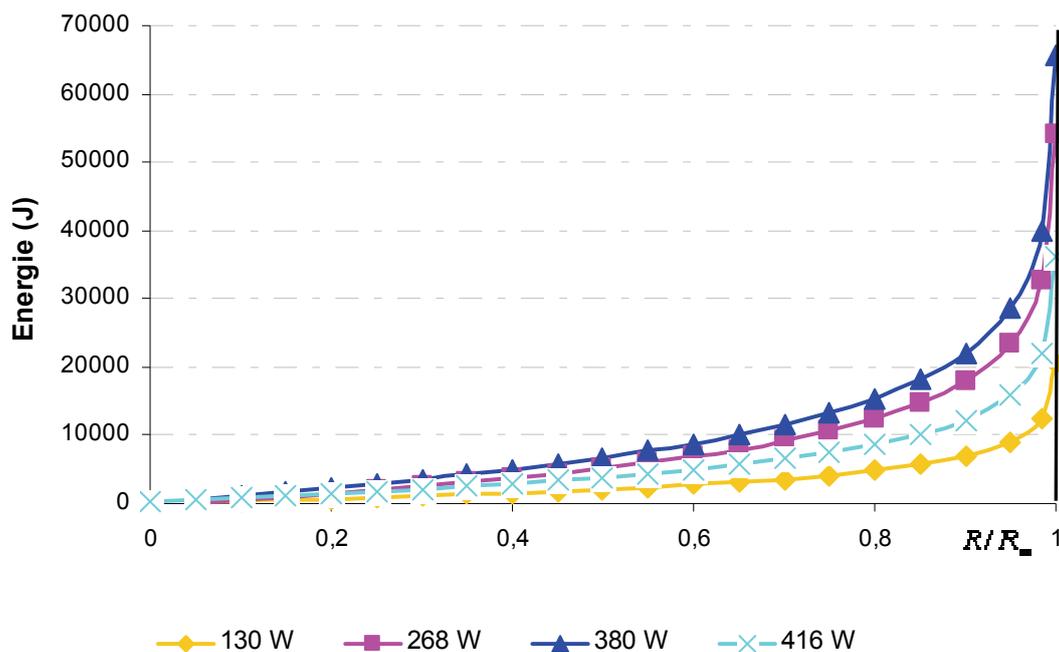
Pour une meilleure maîtrise de la consommation énergétique du procédé d'hydrodistillation, nous avons pensé à représenter l'évolution de l'énergie consommée avec la quantité d'huile essentielle extraite. Sachant que l'énergie consommée et le produit de puissance utilisée et de la durée d'extraction, l'évolution de cette énergie en fonction de la quantité d'huile produite est donnée par l'équation (V-12), obtenue après avoir exprimé le temps en fonction du rendement et des paramètres du modèle de l'équation (V- 5).

$$t = -\frac{1}{k} \ln \left( \frac{1}{B} \left( 1 - \frac{R}{R_{\infty}} \right) \right) \quad (\text{V-10})$$

$$E(R / R_{\infty}) = P \left( -\frac{1}{k} \ln \left( \frac{1}{B} \left( 1 - \frac{R}{R_{\infty}} \right) \right) \right) \quad (\text{V-11})$$

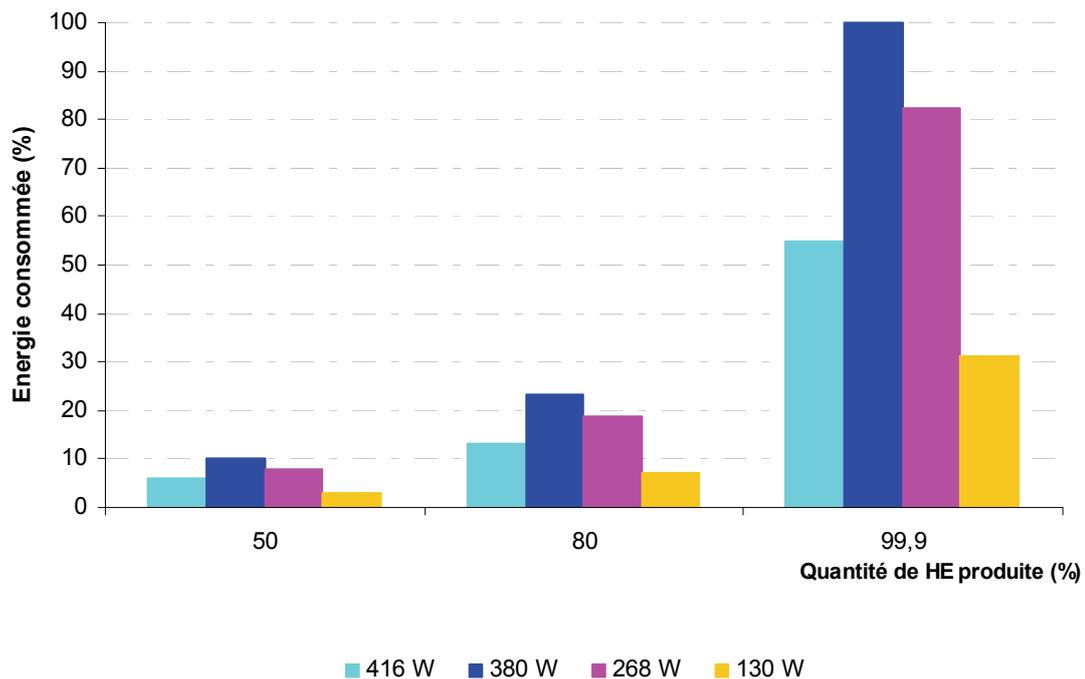
De l'examen des courbes de la figure V- 6, il ressort que c'est intéressant de travailler soit à de faibles puissances (130 W) ou bien à de fortes puissances (416 W). Les puissances intermédiaires (380 et 268 W) montrent une consommation énergétique importante, domaines où les pertes sont importantes (figure IV-1). Par ailleurs, l'équation V-11 et l'allure des courbes de la figure V-6. montrent que l'augmentation de l'énergie consommée avec la quantité d'huile produite n'est pas à tendance linéaire, comme on pourrait le penser, durant tout le processus d'extraction.

En effet, ces courbes montrent une évolution relativement lente et linéaire au début du processus, puis une augmentation rapide avec un écart par rapport à la linéarité est observé à partir d'une production d'huile représentant environ 60 % de la quantité maximale pouvant être extraite dans chaque cas.



**Figure V-6** : Consommation énergétique en fonction du ratio  $R/R_\infty$  à différentes puissances de chauffage

La représentation graphique du pourcentage d'énergie consommée en fonction de la quantité d'huile produite, montre nettement que le passage de 80 % de production d'huile à 99,9 %, nécessite approximativement le double de l'énergie consommée pour produire environ 20 % d'huile essentielle (figure V-7).



**Figure V-7** : Evolution de la consommation d'énergie (%) en fonction de la quantité d'huile produite

## Conclusion

Compte tenu de ces résultats, nous pouvons dire que la consommation énergétique en fonction du ratio  $R/R_{\infty}$  nous donne l'allure du coût de production pour différentes puissances de chauffage. Ainsi, est-il avantageux, du point de vue économique, de prolonger la durée d'extraction des huiles jusqu'à l'épuisement du végétal sachant que la consommation d'énergie par quantité d'huile produite évolue au cours du processus d'extraction et que le prix de vente du gramme d'huile essentielle est constant ? de plus, l'évolution de la composition des huiles essentielles au cours de l'extraction montre que souvent, les huiles obtenues au début du processus sont de meilleure qualité [227,254].

---

---

## **CHAPITRE 6**

### **Aérocondensation et projection industrielle**

---

---

Dans un contexte d'économie d'eau, nous proposons dans cette partie de l'étude d'évaluer les possibilités de substitution de l'eau utilisée généralement comme fluide de refroidissement dans un condenseur, par de l'air fourni par des ventilateurs alimentés à l'énergie solaire photovoltaïque. Nous proposons aussi dans ce chapitre, une projection industrielle des résultats obtenus dans ce travail de recherche, à travers une unité mobile d'extraction d'huiles essentielles autonome en énergie et en eau.

## 1. L'aérocondensation

La condensation représente l'étape déterminante dans le procédé de distillation. Elle permet de recueillir les composés entraînés préalablement par la vapeur. La condensation est réalisée via un échangeur de chaleur qu'on appelle condenseur. Le condenseur se distingue des autres appareils de refroidissement par le fait que le fluide à refroidir subit un changement d'état : passage de l'état vapeur à l'état liquide [255].

Selon le fluide caloporteur, on distingue les condenseurs à eau et les condenseurs à air. Le recours aux aérocondenseurs est dicté par le coût injustifiable au point de vue écologique, économique et social de l'eau froide utilisée dans les échangeurs de chaleurs à eau. En industrie, les condenseurs à air sont la catégorie la plus répandue pour les petites et les moyennes puissances [256].

Des essais de condensation de la vapeur d'eau en utilisant de l'air comme medium de refroidissement ont été réalisés au laboratoire mais les résultats obtenus sont peu concluants ; le ventilateur utilisé ne couvrait pas toute la surface du réfrigérant. Aussi, nous avons eu recours à la simulation pour étudier la faisabilité de substitution de l'eau de refroidissement par de l'air. la méthodologie retenue dans ce chapitre est basée uniquement sur une approche numérique en utilisant :

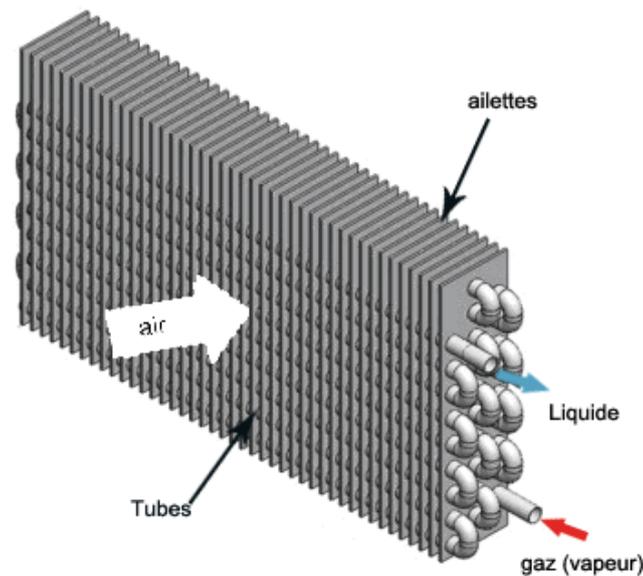
- le logiciel Hysis pour dimensionner et déterminer les caractéristiques et les conditions de fonctionnement de l'aérocondenseur et de ses annexes ;
- le logiciel PV-GIS pour le dimensionnement du système photovoltaïque (alimentation électrique des ventilateurs).

### 1.1 Description d'un aérocondenseur

Un aérocondenseur est un échangeur à tubes-ailettes: il est appelé batterie à ailettes. Ces dernières sont constituées d'un faisceau de tubes, répartis en rangs. Le fluide à refroidir passe dans les tubes et l'air extérieur circule autour des tubes qui sont munis d'ailettes pour augmenter le coefficient d'échange thermique. Les faisceaux tubulaires sont toujours inclinés. Cette disposition est nécessaire pour assurer, à la fois, l'écoulement des condensats et une bonne circulation de l'air à travers les ailettes des tubes. La circulation d'air sur l'échangeur air/fluide à refroidir est assurée aux moyens de ventilateurs axiaux. La vitesse des ventilateurs est réglée pour maintenir la température de sortie d'eau souhaitée [255]. Les ailettes peuvent être disposées de différentes façons. Elles sont en général débitées en aluminium ; ce matériau est utilisé pour sa conductivité thermique élevée et son faible coût.

Un condenseur peut effectuer jusqu'à trois opérations successives : désurchauffe de la vapeur, condensation et sous refroidissement liquide [257] :

- **Phase 1**, la désurchauffe du fluide frigorigène qui va se refroidir et donner sa chaleur sensible.
- **Phase 2**, la condensation du fluide, moment où l'essentiel de la chaleur est donné sous forme de chaleur latente.
- **Phase 3**, le sous-refroidissement du liquide, communiquant encore de la chaleur sensible au fluide refroidisseur.



**Figure VI-1** : Présentation d'un faisceau de tubes à ailettes

## 1.2 Principe de dimensionnement thermique d'un aérocondenseur

Pour l'étude d'un échangeur, l'intérêt économique étant le facteur prépondérant, on cherchera à fabriquer des échangeurs avec le moins de surface d'échange thermique (réduction du coût d'investissement) et de perte de charge possible (réduction du coût d'exploitation). Le couple débit d'air/pertes de charge côté air définit la puissance électrique nécessaire à l'entraînement des ventilateurs. En d'autres termes, il s'agit de déterminer le meilleur compromis entre l'évacuation de la chaleur du fluide chaud vers l'air ambiant et la perte de charge générée par le passage de l'air entre les tubes des faisceaux. Pour ce faire, des techniques de calcul des performances globales de l'échangeur ont été développées. Dans certains cas, le niveau sonore peut devenir un élément aussi important que la quantité de chaleur dans le dimensionnement de l'aérocondenseur [257].

Le dimensionnement conditionne le choix :

- du diamètre des tubes ;
- des dimensions des ailettes ;
- du nombre d'ailettes par mètre de tube ;
- du pas des tubes dans le faisceau ;

- du nombre de rangs ;
- du nombre de passes ;
- de la longueur des tubes ;
- de la largeur du faisceau ;
- de la taille des équipements mécaniques (moteurs, ventilateurs).

### Hypothèses de calcul

- La proportion d'huile dans la vapeur est très faible, ce qui nous amène à considérer que le mélange vapeur d'eau/huile essentielle est de la vapeur d'eau pure.
- La vapeur sera admise à 105°C et sortira liquide après condensation, à 25°C
- La température de l'air ambiant est prise à 20°C

#### 1.2.1 Détermination du coefficient de transmission thermique global $U$

Ce coefficient est fonction des différentes résistances thermiques s'opposant au transfert.

$$\frac{1}{U} = r_i + r_d + r_m + r_a \quad (\text{VI-1})$$

Avec,

$r_i$  : Résistance de film interne

$r_d$  : Résistance de l'encrassement

$r_m$  : Résistance du métal, le plus souvent égale à 0.00015 h.m<sup>2</sup>.°C/kcal

$r_a$  : Résistance du film extérieur

$r_i$  et  $r_d$  sont standardisées selon la nature du fluide. Pour la vapeur d'eau les valeurs de ces résistances sont de 0.0002 et 0.0001 h m<sup>2</sup> °C/Kcal respectivement.

#### 1.2.2 Détermination de la quantité de chaleur totale à évacuer

En se basant sur la vapeur d'eau, il est possible de calculer la quantité de chaleur totale à évacuer par la relation suivante :

$$Q = M_1 (H_1 - H_2) \quad (\text{VI-2})$$

$M_1$  : Débit massique de la vapeur d'eau à condenser (kg/s)

$H_1$  : Enthalpie massique de la vapeur saturée (J/kg)

$H_2$  : Enthalpie massique du condensat (J/kg)

### 1.2.3 Détermination de la masse volumique de l'air

La masse volumique de l'air (en kg/m<sup>3</sup>) dans les conditions du site est calculée à partir de la température ambiante  $t_{a1}$  et de l'altitude du site  $z$  par la relation suivante :

$$\rho_{air} = 1,201 \times \left[ \frac{273,15 + 20}{273,15 + t_{a1}} \right] \times \left( 1 - 2,256 \times 10^{-5} z \right)^{5,256} \quad (\text{VI-3})$$

### 1.2.4 Détermination de la quantité de chaleur échangée dans la cellule

$$q_c = m_2 C_2 (t_{a2} - t_{a1}) \quad (\text{VI-4})$$

Avec :

$C_2$  : Capacité thermique massique de l'air (J/kg.K)

$m_2$  : Débit massique de l'air (kg/s)

$t_{a1}$  : Température d'entrée de l'air (°C)

$t_{a2}$  : Température de sortie de l'air (°C)

### 1.2.5 Détermination de la température de sortie de l'air

La température de sortie de l'air est donnée par la relation suivante :

$$q_c = V_2 \rho_{air} (à t_{a1} \text{ et } z) C_2 (t_{a2} - t_{a1}) \quad (\text{VI-5})$$

$$q_c = U \cdot A_s \cdot K \cdot DTLM \quad (\text{VI-6})$$

Avec :

$V_2$  : Débit volumique de l'air (m<sup>3</sup>/s)

$U$  : Coefficient de transmission thermique globale (W/m<sup>2</sup> · K)

$A_s$  : Surface d'échange d'une cellule aérocondenseur (m<sup>2</sup>)

$K$  : Facteur correctif de DTLM

**DTLM** : Différence Moyenne Logarithmique des températures

$$q_c = U \cdot A_s \cdot K \left[ \frac{(T_1 - t_{a2}) - (T_2 - t_{a1})}{\ln \left( \frac{(T_1 - t_{a2})}{(T_2 - t_{a1})} \right)} \right] \quad (\text{VI-7})$$

Ce qui donne:

$$U \cdot A_s \cdot K \left[ \frac{(T_1 - t_{a2}) - (T_2 - t_{a1})}{\ln \left( \frac{(T_1 - t_{a2})}{(T_2 - t_{a1})} \right)} \right] = V_2 \rho_{\text{air}} (\text{à } t_{a1} \text{ et } z) C_2 (t_{a2} - t_{a1}) \quad (\text{VI-8})$$

Une solution de l'équation permet d'avoir la température de sortie de l'air.

### 1.2.6 Détermination du nombre de cellules requises pour le service

Le nombre de cellules  $N_c$  requises pour le service est égal à la puissance thermique totale à évacuer divisée par la puissance thermique échangée dans une cellule selon la formule suivante :

$$N_c = \frac{Q}{q_c} \quad (\text{VI-9})$$

### 1.2.7 Détermination de la surface nécessaire par cellule

De l'équation VI-6 on détermine la surface  $A_s$  nécessaire par cellule :

$$A_s = \frac{q_c}{U \cdot K \cdot DTLM} \quad (\text{VI-10})$$

### 1.3 Dimensionnement des ventilateurs

La surface totale des ventilateurs installée sur une baie doit être supérieure ou égale à 40% de sa surface faciale [258]. Sur cette base le diamètre  $D_v$  de ventilateur doit être choisi.

$$\frac{N \pi D_v^2}{4} \geq A_s$$

Le débit volumique de l'air par ventilateur est donné par :

$$\frac{v_f \pi D_v^2}{4} = V_2 \quad (\text{VI-11})$$

Pour le choix du couple ventilateur/moteur chaque fournisseur de ventilateurs dispose d'une banque de données des courbes de performances. Ces graphes présentent la relation entre le débit volumique de l'air, la pression statique du ventilateur, sa vitesse et son efficacité. La puissance à fournir par le ventilateur est donnée par :

$$P_{vent} = \frac{V_2 \times (\Delta P_t)_{vent}}{\eta_{vent}} \quad (\text{VI-12})$$

La puissance du moteur doit tenir compte de son efficacité et de l'efficacité d'entraînement. Elle est donnée par la relation suivante

$$P_{Mot} = \frac{P_{vent}}{\eta_{ent} \eta_{mot}} \quad (\text{VI-13})$$

## 1.4 Résultats de dimensionnement de l'aérocondenseur

Dans le tableau VI-1, sont résumées les variables d'entrée et de sortie pour le logiciel de simulation Hysys [259]. Hysys, commercialisé par la société Hyprotech ; filiale d'AspenTech est un logiciel de simulation de procédés chimiques utilisé dans beaucoup d'industries de procédés qui permet de simuler le fonctionnement d'installations chimiques complexes en régime permanent et en régime dynamique. A partir de la donnée des corps impliqués dans la transformation chimique et les séparations, des modèles thermodynamiques permettant de décrire entre autres les équilibres liquide-vapeur sur lesquels reposent les séparations, des cinétiques des réactions chimiques et enfin, du schéma de procédé.

**Tableau VI-1 : Variables d'entrée et de sortie pour le logiciel de simulation Hysys**

| Paramètres fixes d'entrées           | Variables d'entrées                | Variables de sortie |
|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------|
| vapeur à l'entrée (eau pure 100 %)   | $20 < t_{a1} < 30^{\circ}\text{C}$ | UA                  |
| liquide à la sortie (eau pure 100 %) | $30 < t_{a2} < 50^{\circ}\text{C}$ | D <sub>2</sub>      |
| P entrée: 100 Kpa                    | $30 < T_2 < 40^{\circ}\text{C}$    |                     |
| P sortie : 99 Kpa                    |                                    |                     |
| T <sub>1</sub> =105°C.               |                                    |                     |
| D <sub>1</sub> =100 Kg /hr           |                                    |                     |

### 1.4.1 Débit d'air (D<sub>2</sub>)

Pour un débit de vapeur (D<sub>1</sub>) de 100 kg/h le logiciel nous donne des résultats selon le débit d'air qui passe à travers les ventilateurs de l'aérocondenseur. La vitesse du ventilateur est fixée à 100 tr/min et un débit d'air brassé de 4500 m<sup>3</sup>/h par ventilateur. Lorsque nous augmentons la vitesse de ventilation, la température de sortie de l'air

augmente ce qui n'arrange pas l'utilisateur, la température admissible pour le travail ne doit pas excéder 40°C.

#### 1.4.2 Calcul de la surface d'échange et coefficient d'échange

A partir des variables de sortie de  $UA_s$  et  $D_2$  nous pouvons déterminer : La surface d'échange et les caractéristiques du système de ventilation (puissance, vitesse faciale, nombre de ventilateurs, section faciale).

#### 1.4.3 Le coefficient d'échange global U

Le coefficient d'échange global U de l'aérocondenseur est déterminé par l'équation (VI-1). Il est fonction des différentes résistances thermiques s'opposant au transfert. Le coefficient du film  $ra$  est fonction de la vitesse faciale de l'air (tableau VI-2).

**Tableau VI-2 : coefficient du film et vitesse faciale de l'air**

| Coefficient de film extérieur<br>$ra$ (h.m <sup>2</sup> .°C/kcal) | Vitesse faciale de l'air<br>$V_f$ (m/s) |
|---|---|
| 0,00096   | 3,20                                    |
| 0,00102   | 3,02                                    |
| 0,00107   | 2,87                                    |
| 0,00112   | 2,74                                    |
| 0,00118   | 2,58                                    |
| 0,00121   | 2,48                                    |
| 0,00125   | 2,38                                    |
| 0,00128   | 2,26                                    |
| 0,00132   | 2,16                                    |

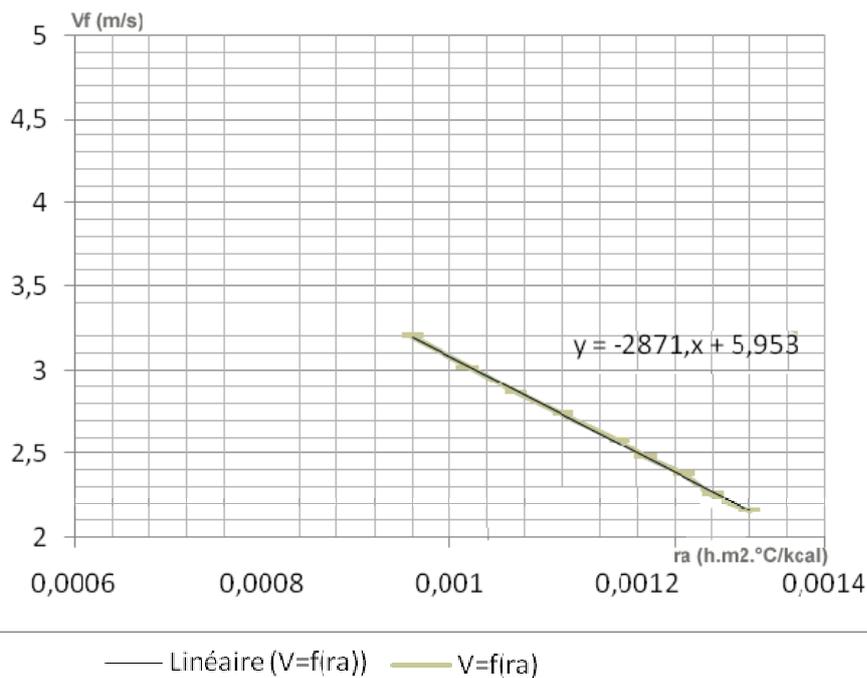
La vitesse faciale de l'air est égale au rapport du débit volumique de l'air (donné par le Hysys) et la section faciale du ventilateur qui est égale à :

$$V_f = \frac{D_{\text{air/v}}}{\frac{\pi D_v^2}{4}} \quad (\text{VI-14})$$

Ainsi pour un débit d'air  $D_{\text{air/v}} = 4500 \text{ m}^3/\text{h}$  et un diamètre  $D_v = 0.68 \text{ m}$  nous obtenons une vitesse faciale  $V_f$  de 3,44 m/s

Par ailleurs, la fonction  $V_f = f(r_a)$  (figure VI-2) tracée en fonction des données du tableau VI-2 est une droite d'équation :  $V_f = -2871 \cdot r_a + 5.953$

Connaissant  $V_f = 3,44 \text{ m/s}$  nous pouvons calculer la valeur du coefficient du film extérieur (air)  $r_a$ . Cela nous donne une valeur de  $r_a = 0.0009$



**Figure VI-2** : la vitesse faciale en fonction du coefficient du film extérieur (air)

$$\frac{1}{U} = r_i + r_d + r_m + r_a$$

$$\frac{1}{U} = 0.0002 + 0.0001 + 0.00015 + 0.0009$$

$$U = 754,75 \text{ kcal/h.m}^2.\text{°C}$$

$$U = 3158,61 \text{ KJ/h.m}^2.\text{°C}$$

#### 1.4.4 La surface d'échange

Pour un débit de vapeur de 100 kg/h et une température de sortie d'air  $t_{a2} = 30^\circ\text{C}$ , le logiciel Hysys nous donne une valeur de 10440.42 kJ/C.h pour  $UA_s$

=> La surface d'échange est égale à  $A_s = 3,31\text{m}^2$ .

La surface d'échange est la surface d'un serpentin assimilé à un tube cylindrique d'un diamètre  $D_{\text{tuyau}}$  et d'une longueur  $L$ . Le tube est celui de distribution de gaz naturel dont le diamètre est de 0.032m.  $A_s = \pi L D_{\text{tuyau}}$

$$L = \frac{A_s}{\pi D_{\text{tuyau}}} = 33 \text{ m}$$

#### 1.5 Disposition du système de ventilation et du serpentin

Pour ne pas s'éloigner du secteur industriel, la surface des ventilateurs minimale requise doit représenter 40 % de la baie réfrigérante. La baie réfrigérante est un rectangle de dimension Z1, Z2.

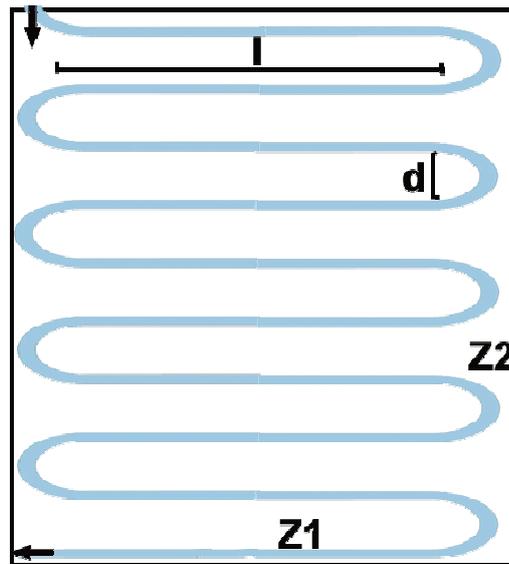


Figure VI-3 : Schéma du serpentin

Si  $n$  est le nombre de courbures et  $d$  le diamètre interne de courbure du tube serpentin on a :

$$l + \frac{d}{2} + \frac{d}{2} = Z_1 \quad (\text{VI-15})$$

$$\left( n \times \pi \times \frac{d}{2} \right) + (n + 1) \times l = L = \frac{A_s}{\pi D_{\text{tuyau}}} \quad (\text{VI-16})$$

$$(n \times d) + (n + 1) \times D_{\text{tuyau}} = Z_2 \quad (\text{VI-17})$$

$n$  sera solution de l'équation suivante :

$$\left[ 0.032 \left( 1 - \left( \frac{\pi}{2} \right) \right) + Z_1 \right] n^2 + \left[ Z_2 \left( \left( \frac{\pi}{2} \right) - 1 \right) + 0.032 + Z_1 - L \right] n + (0.032 - Z_2) = 0 \quad (\text{VI-18})$$

Les ventilateurs peuvent être disposés soit sur deux rangées ou bien sur trois rangées selon les configurations suivantes :

### 1.5.1 Configuration 1

Dans la configuration 1 les ventilateurs sont disposés sur une seule rangée (figure VI-4). Les distances entre les ventilateurs est de 0.10 m et la distance entre les ventilateurs et les limites de la baie réfrigérante est de 0.05 m.

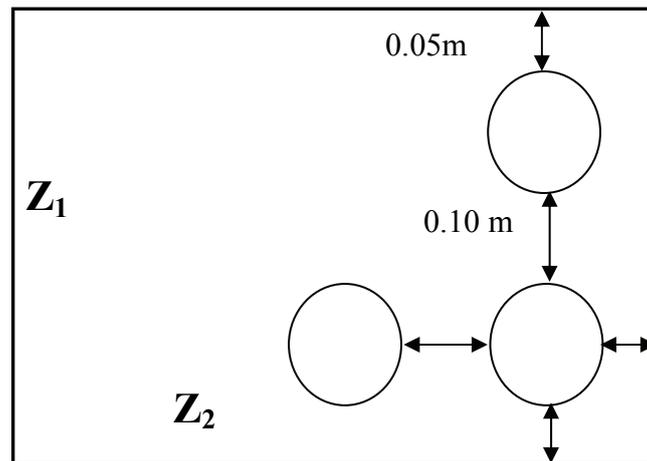


Figure VI-4 : Disposition des ventilateurs sur deux rangées

$$Z_1 = 2 \times D_v + 0.05 + 0.05 + 0.1 \quad (\text{VI-19})$$

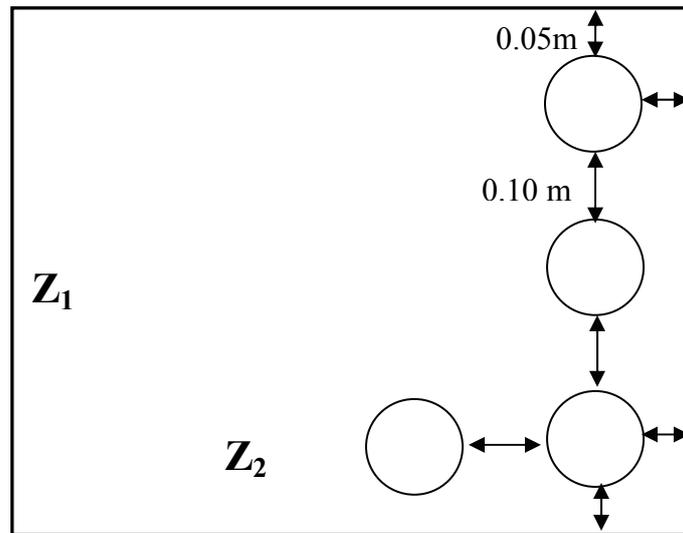
$$Z_2 = D_v \times N' + 0.1 \times (N' - 1) + 0.05 + 0.05 \quad (\text{VI-20})$$

$$Z_1 = 2 \times D_v + 0.2 \quad (\text{VI-21})$$

$$Z_2 = N'(D_v + 0.1) \quad (\text{VI-22})$$

### 1.5.2 Configuration 2

Dans la configuration 2, les ventilateurs sont disposés sur trois rangées (figure VI-5). La distance entre les ventilateurs est de 0.10 m et la distance entre les ventilateurs et les limites de la baie réfrigérante est de 0.05 m.



**Figure VI-5** : Disposition des ventilateurs sur trois rangées

$$Z_1 = 3 \times D_v + 0.05 + 0.05 + 0.1 + 0.1 \quad (\text{VI-23})$$

$$Z_2 = D_v \times N' + 0.1 \times (N' - 1) + 0.05 + 0.05 \quad (\text{VI-24})$$

$$Z_1 = 3 \times D_v + 0.3 \quad (\text{VI-25})$$

$$Z_2 = N'(D_v + 0.1) \quad (\text{VI-26})$$

Ainsi, les résultats de dimensionnement de l'aérocondenseur par le logiciel de simulation Hysys, sont résumés dans le tableau VI-3

**Tableau VI-3 : Résultats de dimensionnement de l'aérocondenseur**

| Paramètres                                |                 | Valeurs                    |
|---|-----------------|----------------------------|
| Débit de vapeur                           | D <sub>1</sub>  | 100 kg/h                   |
| Débit d'air                               | D <sub>2</sub>  | 43252,28 m <sup>3</sup> /h |
| Température d'entrée d'air                | t <sub>a1</sub> | 25°C                       |
| Température sortie d'air                  | t <sub>a2</sub> | 30°C                       |
| Température sortie condensât              | T <sub>2</sub>  | 30°C                       |
| Longueur de la baie réfrigérante          | Z <sub>2</sub>  | 2,34 m                     |
| Largeur de la baie réfrigérante           | Z <sub>1</sub>  | 3,24 m                     |
| Longueur total du serpentin               | L               | 33 m                       |
| Longueur de tube serpentin                | l               | 2,125 m                    |
| Diamètre interne de courbure du serpentin | d               | 0,125 m                    |
| Nombre de courbures                       | n               | 13                         |
| Nombre de ventilateurs                    | N               | 10                         |
| Nombre de ventilateur par rangée          | N'              | 4                          |

Les ventilateurs sont disposés selon la configuration 2

### 1.6 Détermination des besoins de chaque ventilateur

Notre besoin réel en énergie ou l'énergie requise est donné par la chaleur cédée par la vapeur d'eau en se condensant et se refroidissant. Cette valeur est fournie par le logiciel de simulation Hysys qui prend en considération un facteur de correction lors du calcul. La puissance absorbée du ventilateur peut être calculée en Cheval Vapeur par la formule suivante :

$$P_v = \frac{Q_c}{1061 V_f (t_{a2} - t_{a1})} \quad (\text{VI-27})$$

La puissance en Cheval Vapeur : 1CV = 736 Watt.

Notons que Qc ici est donné en kcal/h.

Pour un Débit de vapeur de 100 kg/h  $Q_c$  est de 61 230 (kcal/h). Le calcul de puissance des ventilateurs est fonction des températures d'entrée et de sortie d'air. Aussi, Pour chaque mois de l'année, nous considérons une température moyenne mensuelle, qui va être égale à la température d'entrée de l'air. Le calcul de puissance est ensuite fait pour chaque mois pour différentes températures de sortie de l'air  $t_2$ . Comme choix final, nous prenons le cas le plus défavorable soit la température de sortie d'air la plus basse.

**Tableau VI-4: Puissance des ventilateurs en fonction de la température moyenne mensuelle ( $t_1$ )**

| Mois      | $t_1$ (°C) | $P_V$ (kW) |
|-----------|------------|------------|
| Janvier   | 20         | 1,23       |
| Février   | 20         | 1,23       |
| Mars      | 20         | 1,23       |
| Avril     | 21         | 1,37       |
| Mai       | 24         | 2,05       |
| Juin      | 27         | 4,11       |
| Juillet   | 30         | 6,17       |
| Août      | 30         | 6,17       |
| Septembre | 29         | 6,17       |
| Octobre   | 25         | 2,46       |
| Novembre  | 21         | 1,37       |
| décembre  | 20         | 1,23       |

## 2. Dimensionnement photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est une alternative intéressante à l'énergie fossile et s'inscrit dans une logique de développement durable, elle est viable, vivable et équitable. L'Algérie avec plus de deux millions de km<sup>2</sup> de superficie, reçoit l'équivalent de 300 milliards de Tep par an en énergie solaire. En termes d'insolation, l'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 kWh sur la quasi-totalité du territoire national. La durée d'insolation quant à elle dépasse les 2000 heures

annuellement et peut atteindre les 3900 heures sur les hauts plateaux et le Sahara [260,261]. Devant ce potentiel considérable, l'utilisation et l'exploitation de cette forme d'énergie peuvent avoir des incidences énergétiques et environnementales importantes.

A cette fin, l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque peut apporter une réponse appropriée à la fourniture de l'énergie nécessaire au fonctionnement de notre aérocondenseur. Un dimensionnement photovoltaïque va nous permettre de connaître la quantité de module à utiliser. Pour cela, nous avons utilisé un logiciel de dimensionnement en ligne le PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System).

PVGIS peut fournir le gisement solaire utilisant des cartes ou bien directement les coordonnées géographiques du lieu (latitude et longitude), il calcule l'irradiation (selon le lieu et les paramètres d'inclinaison et d'orientation) et détermine la production en électricité d'un système photovoltaïque de caractéristiques connues. L'application de PVGIS commence par le choix d'un lieu ; la ville d'Alger dans notre cas.

### 2.1 L'irradiation solaire

Le logiciel PVGIS fournit l'irradiation mensuelle (ou quotidienne) de la ville choisie après avoir spécifié l'inclinaison et l'irradiation optimale à inclinaison optimale. Les résultats sont consignés dans le tableau VI-5 avec

$H_{hor}$  L'irradiation solaire à inclinaison horizontale ( $Wh/m^2 \cdot Jour$ )

$H_{opt}$  L'irradiation solaire à l'angle d'inclinaison optimale ( $Wh/m^2 \cdot Jour$ )

$H_{(90)}$  L'irradiation solaire à  $90^\circ$  ( $Wh/m^2 \cdot Jour$ )

$I_{opt}$  L'angle d'inclinaison optimal pour chaque mois ( $^\circ$ )

**Tableau VI-5: L'irradiation solaire mensuelle sur Alger**

| Mois             | $H_{Hor}$ | $H_{opt}$ | $H_{(90)}$ | $I_{Opt}$ |
|------------------|-----------|-----------|------------|-----------|
| <b>Janvier</b>   | 2,29      | 3,5       | 3,39       | 59        |
| <b>Février</b>   | 3,1       | 4,25      | 3,64       | 51        |
| <b>Mars</b>      | 4,24      | 5,06      | 3,54       | 39        |
| <b>Avril</b>     | 5,29      | 5,58      | 2,98       | 23        |
| <b>Mai</b>       | 6,36      | 6,1       | 2,52       | 10        |
| <b>Juin</b>      | 6,94      | 6,36      | 2,25       | 3         |
| <b>Juillet</b>   | 6,88      | 6,45      | 2,41       | 7         |
| <b>Août</b>      | 6,29      | 6,4       | 3,03       | 18        |
| <b>Septembre</b> | 4,98      | 5,74      | 3,65       | 34        |
| <b>Octobre</b>   | 3,77      | 5         | 4,02       | 48        |
| <b>Novembre</b>  | 2,5       | 3,71      | 3,45       | 57        |
| <b>Décembre</b>  | 2,08      | 3,31      | 3,31       | 61        |

## 2.2 La production d'électricité

Le logiciel PVGIS nous fournit la quantité d'électricité produite par un panneau photovoltaïque selon les caractéristiques de ce dernier. Les paramètres du module photovoltaïque utilisé sont:

- La puissance unitaire de module ; Watt Crête qui est la puissance maximale pouvant être fournie dans les conditions d'ensoleillement standard (Ensoleillement de  $1000 \text{ W/m}^2$ ) ; les modules utilisés sont de puissance crête  $200 \text{ Wh/ m}^2$ . Cela veut dire qu'ils sont de rendement égal à 20 % (si les pertes de système ne sont pas considérées). Notons toutefois que cette valeur est juste indicative, l'ensoleillement varie de façon continue ; à Alger, il dépasse souvent les  $1000 \text{ W/m}^2$ .

- Les pertes de système : nous considérons le pourcentage par défaut pris par le logiciel.
  - Les pertes dues à la température : 11.9%.
  - Les pertes dues à l'angle de réflexion : 2.5%.
  - Autres pertes : 14%.
  - Pertes du système combiné : 26.1%.
  
- L'inclinaison : le logiciel peut opter pour un optimal pour la ville choisie ; soit 32°.
- L'orientation des modules : le logiciel propose une inclinaison optimale pour chaque lieu. Ainsi une inclinaison nulle est donnée pour Alger. Après introduction de ces données, le logiciel donnera le rapport d'électricité produite (tableau VI-6).

**Tableau VI-6 : L'électricité produite (par surface unitaire du système)**

| Mois             | Inclinaison de 32° |       | Orientation de 0° |       |
|------------------|--------------------|-------|-------------------|-------|
|                  | $E_j$              | $E_m$ | $H_j$             | $H_m$ |
| <b>Janvier</b>   | 0,55               | 17.1  | 3.50              | 109   |
| <b>Février</b>   | 0,66               | 18.5  | 4.25              | 119   |
| <b>Mars</b>      | 0,76               | 23.6  | 5.06              | 157   |
| <b>Avril</b>     | 0,83               | 25.0  | 5.58              | 167   |
| <b>Mai</b>       | 0,89               | 27.6  | 6.10              | 189   |
| <b>Juin</b>      | 0,91               | 27.3  | 6.36              | 191   |
| <b>Juillet</b>   | 0,91               | 28.3  | 6.45              | 200   |
| <b>Août</b>      | 0,9                | 27.9  | 6.40              | 198   |
| <b>Septembre</b> | 0,83               | 24.9  | 5.74              | 172   |
| <b>Octobre</b>   | 0,74               | 22.8  | 5.00              | 155   |
| <b>Novembre</b>  | 0,57               | 17.0  | 3.71              | 111   |
| <b>Décembre</b>  | 0,52               | 16.0  | 3.31              | 102   |
| <b>Annuel</b>    | 0,756              | 23.0  | 5.13              | 156   |

Avec :

$E_j$  : Production journalière moyenne d'électricité (kWh)

$E_m$  : Production mensuelle moyenne d'électricité (kWh)

$H_j$  : l'irradiation journalière globale par mètre carré du système considéré (kWh/m<sup>2</sup>)

$H_m$  : l'irradiation mensuelle globale par mètre carré du système considéré

### 2.3 Détermination de la surface des panneaux Photovoltaïques

La puissance nécessaire à l'alimentation du ventilateur a été déterminée en fonction des différentes températures d'entrée et de sortie de l'air (tableau VI-4).

Les besoins énergétiques journaliers spécifiques à chaque mois de l'année (8 heures de travail par jour) de l'aérocondenseur ( $E_{cd}$  kWh/jour) sont calculés à partir de ces puissances. La surface du module Photovoltaïque ( $S_{PV}$  en m<sup>2</sup>) est le rapport entre la quantité d'énergie fournie par les panneaux ( $E_{PV}$  kWh/jour.m<sup>2</sup>) et le besoin énergétique journalier (kWh/jour).

Avec :

$t_{a1}$  : température d'entrée de l'air (°C)

$E_{cd}$  : Besoins énergétiques journaliers de l'aérocondenseur (kWh/jour)

$E_{PV}$  : Quantité d'énergie fournie par les panneaux (kWh/jour.m<sup>2</sup>)

$S_{PV}$  : La surface du panneau Photovoltaïque (m<sup>2</sup>)

**Tableau VI-7: La surface du module Photovoltaïque en fonction des besoins énergétiques de l'aérocondenseur (débit de vapeur de 100 kg/h)**

| Mois      | $t_{a1}$<br>(°C) | $E_{PV}$ | $E_{cd}$ | $S_{PV}$ |
|-----------|------------------|----------|----------|----------|
| Janvier   | 20               | 0.55     | 9.87     | 17,95    |
| Février   | 20               | 0.66     | 9.87     | 14,95    |
| Mars      | 20               | 0.76     | 9.87     | 12,99    |
| Avril     | 21               | 0.83     | 10.97    | 13,22    |
| Mai       | 24               | 0.89     | 16.45    | 18,48    |
| Jun       | 27               | 0.91     | 32.97    | 36,16    |
| Juillet   | 30               | 0.91     | 49.36    | 54,24    |
| Août      | 30               | 0.90     | 49.36    | 54,84    |
| Septembre | 29               | 0.83     | 49.36    | 59,47    |
| Octobre   | 25               | 0.74     | 19.74    | 26,68    |
| Novembre  | 21               | 0.57     | 10.97    | 19,25    |
| décembre  | 20               | 0.52     | 9.87     | 18,98    |

Des résultats du tableau VI-7, il apparaît que la surface du module photovoltaïque nécessaire pour le fonctionnement d'un aérocondenseur pour un débit de vapeur de 100 kg/h, diffère énormément d'un mois à un autre. Cette surface est plus grande durant les mois où l'irradiation solaire est maximale. En effet, durant ces mois la température d'entrée d'air est élevée ce qui engendre un grand besoin en puissance des ventilateurs et par conséquent une consommation d'énergie plus importante.

### 3. Projection industrielle

Dans les chapitres précédents nous avons montré la faisabilité d'intégration des énergies renouvelables dans un procédé d'extraction d'huiles essentielles. En se basant sur l'ensemble des résultats obtenus, nous proposons dans cette partie de l'étude, la possibilité de concevoir une unité d'extraction mobile, autonome en énergie et en eau. La proximité, la mobilité, l'autonomie en énergie et en eau, constituent les atouts majeurs de

l'unité d'extraction. Cette technologie pourrait permettre de réduire l'impact sur l'environnement et promouvoir le développement rural en produisant des biens et services générateurs d'emplois. Cette unité d'extraction sera baptisée **Mobilab** [262].

### **3.1 Les atouts du Mobilab**

#### **3.1.1 Autonomie énergétique**

Les besoins énergétiques liés au fonctionnement du Mobilab sont assurés par l'intégration de différentes énergies renouvelables. La biomasse issue des déchets générés par l'extraction d'huiles essentielles sera utilisée pour la production de vapeur. Les résultats obtenus au chapitre 4 ont montré que la combustion de matière végétale rejetée par une production d'huile essentielle est en mesure de fournir la chaleur nécessaire au processus d'extraction. Par ailleurs, les besoins en électricité du Mobilab, seront assurés par l'énergie solaire photovoltaïque.

#### **3.1.2 Autonomie en eau**

L'Autonomie en eau de l'unité d'extraction sera assurée par la substitution de l'eau utilisée généralement comme fluide de refroidissement dans un condenseur, par de l'air fourni par des ventilateurs. Ces derniers seront alimentés à l'énergie solaire photovoltaïque. Les calculs développés dans la première partie de ce chapitre seront utilisés pour le dimensionnement de l'aérocondenseur du Mobilab. Le Mobilab sera équipé d'un système de cohobage qui va permettre non seulement d'économiser de l'eau, mais aussi d'éviter le rejet dans la nature d'une eau florale dont certains constituants peuvent se révéler toxiques par effet de concentration.

#### **3.1.3 Mobilité**

L'unité d'extraction est prévue mobile afin de réduire au maximum les frais de transport et de stockage de la matière végétale et d'éviter la dégradation du substrat végétal après cueillette. Aussi, le Mobilab sera aménagé dans un conteneur de semi remorque. Les dimensions du conteneur dépendent de la capacité de l'unité d'extraction. Nous proposons trois types de conteneurs (figure VI-6)

| <b>Conteneur 20 pieds (6.09m)</b>   |   |  |
|---|---|--|
|    | Dimensions Intérieures  | Longueur 6.00 m<br>Largeur 2.30 m<br>Hauteur 2.40 m  |
|   | Ouverture de Portes   | Largeur 2.286 m<br>Hauteur 2.278 m                   |
|   | Poids du Tare<br>Capacité en Volume<br>Capacité de Chargement | 1 900 kg<br>33.12 m <sup>3</sup><br>22.100 kg        |
| <b>Conteneur 30 pieds (9.15m)</b>   |   |  |
|   | Dimensions Intérieures  | Longueur 9.00 m<br>Largeur 2.30 m<br>Hauteur 2.40 m  |
|   | Ouverture de Portes   | Largeur 2.286 m<br>Hauteur 2.278 m                   |
|   | Poids du Tare<br>Capacité en Volume<br>Capacité de Chargement | 2492 kg<br>49.68 m <sup>3</sup><br>24 749 kg         |
| <b>Conteneur 45 pieds (13.7m)</b>   |   |  |
|  | Dimensions Intérieures  | Longueur 13.70 m<br>Largeur 2.40 m<br>Hauteur 2.60 m |
|   | Ouverture de Portes   | Largeur 2.340 m<br>Hauteur 2.585 m                   |
|   | Poids du Tare<br>Capacité en Volume<br>Capacité de Chargement | 4110 kg<br>85.5 m <sup>3</sup><br>28.390 kg          |

Figure VI-6 : Caractéristiques et dimensions des conteneurs

### 3.2 Capacité d'extraction des Mobilab

Chaque Mobilab est caractérisé par :

- Un débit de vapeur journalier ;
- Une quantité de matière végétale pour l'extraction ;
- Une quantité de biomasse résiduelle à brûler.

On se fixe, pour le Mobilab moyen, un objectif de 800 kg de matière végétale par jour pour l'extraction, avec 800 kg de vapeur par jour, pour un fonctionnement de huit heures, à savoir 100 kg/h, et ce en deux manipulations. La moitié de la matière végétale résiduelle sera utilisée comme biomasse à brûler. Dans le chapitre IV, nous avons démontré que la puissance fournie par la combustion de la biomasse peut suffire pour produire de la vapeur nécessaire à l'extraction, si les conditions d'exploitation répondent aux conditions suivantes:

$$\dot{m} \text{ (kg/h)} \leq 0.5F \text{ (kg/h)}$$

Et le débit de vapeur (masse vapeur / masse de substrat végétal / heure) = 0,01 et 0,4 kg / kg.h.

Le tableau VI-8 résume les débits de vapeur et de matière pour chaque Mobilab

**Tableau VI-8 : Débits de vapeur et de matière pour chaque Mobilab**

|                                    | <b>Petit Mobilab</b> | <b>Moyen Mobilab</b> | <b>Grand Mobilab</b> |
|------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Débit de vapeur (kg/jr)            | 400<br>(50 kg/h)     | 800<br>(100 kg/h)    | 1600<br>(200 kg/h)   |
| Matière végétale à traiter (kg/jr) | 400                  | 800                  | 1600                 |
| Biomasse à brûler (kg/jr)          | 200                  | 400                  | 800                  |

### 3.3 Dimensionnement du Mobilab

#### 3.3.1 La chaudière

Une cheminée en matériau réfractaire avec un foyer fermé sera utilisée comme chaudière à vapeur. Cette dernière est décrite dans le chapitre 4.

#### 3.3.2 L'extracteur

Des caissons mobiles seront utilisés comme extracteur d'huiles essentielles. A l'intérieur de ces caissons nous mettrons la matière végétale. Les caissons disposent des conduites se trouvant sur les deux cotés pour le passage de la vapeur d'eau.



Figure VI-7 : Caissons mobiles

Les caissons sont des parallélépipèdes en acier inoxydable d'une légère pente (2%) et munis de panier à l'intérieur pour y déposer la matière végétale, Ils sont reliés entre eux et avec le Mobilab (sortie de ballon et condenseur) par des conduites 30/32 mm. Le nombre de caisson est variable selon le Mobilab et la quantité de matière végétale à traiter.

#### 3.3.3 Le condenseur

Les différents calculs développés dans la première partie de ce chapitre, vont nous permettre de dimensionner un aérocondenseur pour chaque Mobilab. La baie réfrigérante de dimension  $Z_1$ ,  $Z_2$  est représentée par un serpentin d'un diamètre  $D$  et d'une longueur  $L$  fixée contre le mur du Mobilab. Les dimensions de la baie vont dépendre de celles des Mobilab.

**Tableau VI-9 : Résultats de dimensionnement de l'aérocondenseur**

| Paramètres                             | Débit de vapeur $D_1$ Kg/h |          |          |
|--|----------------------------|----------|----------|
|  | 50                         | 100      | 200      |
| Débit d'air $D_2$ m <sup>3</sup> /h    | 21626,4                    | 43252,28 | 86504,56 |
| Température d'entrée d'air $t_{a1}$ °C | 25                         | 25       | 25       |
| Température sortie d'air $t_{a2}$ °C   | 30                         | 30       | 30       |
| Température sortie condensât $T_2$ °C  | 30                         | 30       | 30       |
| Largeur baie réfrigérante $Z_1$ (m)    | 2,34                       | 2,34     | 2,34     |
| Longueur baie réfrigérante $Z_2$ (m)   | 1,56                       | 3,24     | 5,46     |
| Longueur totale du serpentín L (m)     | 16,44                      | 33       | 65,76    |
| Longueur de tube serpentín l (m)       | 2,108                      | 2,125    | 2,164    |
| Diamètre courbure du serpentín d (m)   | 0,232                      | 0,125    | 0,176    |
| Nombre de courbures n                  | 6                          | 13       | 27       |
| Nombre de ventilateurs N               | 5                          | 10       | 20       |
| Nombre de ventilateur / rangée N'      | 2                          | 4        | 7        |

Les ventilateurs sont disposés selon la configuration 2

### 3.3.4 Détermination des besoins des ventilateurs

Les besoins réels en énergie correspondent à la quantité de chaleur cédée par la vapeur d'eau en se condensant et en se refroidissant. Cette valeur est fournie par le Hysys pour chaque Mobilab (tableau VI-10)

**Tableau VI-10 : Chaleur échangée par chaque Mobilab**

|                        | Mobilab 1 | Mobilab 2 | Mobilab 3 |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Débit de vapeur (kg/h) | 50        | 100       | 200       |
| $Q_c$ (Kcal/h)         | 30615     | 61230     | 122460    |

L'équation (VI-27) va nous permettre le calcul des puissances des différents ventilateurs en fonction de la température d'entrée d'air qui est égale à la température moyenne mensuelle (tableau VI-11).

**Tableau VI-11: Puissance des ventilateurs en fonction de la température moyenne mensuelle ( $t_{a1}$ )**

| Mois      | $t_{a1}$ (°C) | $P_V$ (kW) |           |           |
|-----------|---------------|------------|-----------|-----------|
|           |               | Mobilab 1  | Mobilab 2 | Mobilab 3 |
| Janvier   | 20            | 0,622      | 1,23      | 2,467     |
| Février   | 20            | 0,622      | 1,23      | 2,467     |
| Mars      | 20            | 0,622      | 1,23      | 2,467     |
| Avril     | 21            | 0,691      | 1,37      | 2,742     |
| Mai       | 24            | 1,037      | 2,05      | 4,112     |
| Juin      | 27            | 2,075      | 4,11      | 8,227     |
| Juillet   | 30            | 3,112      | 6,17      | 12,34     |
| Août      | 30            | 3,112      | 6,17      | 12,34     |
| Septembre | 29            | 3,112      | 6,17      | 12,34     |
| Octobre   | 25            | 1,245      | 2,46      | 4,935     |
| Novembre  | 21            | 0,691      | 1,37      | 2,742     |
| décembre  | 20            | 0,622      | 1,23      | 2,467     |

### 3.3.5 La surface du module Photovoltaïque

Pour chaque mobilab, nous calculons les besoins énergétiques journaliers spécifiques à chaque mois de l'année (8 heures de travail par jour) de l'aérocondenseur ( $E_{cd}$  kWh/jour) et la surface du module Photovoltaïque ( $S_{PV}$  en  $m^2$ ).

**Tableau VI-12: La surface du module Photovoltaïque en fonction des besoins énergétiques de l'aérocondenseur par Mobilab**

| Mois             | Mobilab 1 |          | Mobilab 2 |          | Mobilab3 |          |
|------------------|-----------|----------|-----------|----------|----------|----------|
|                  | $E_{cd}$  | $S_{PV}$ | $E_{cd}$  | $S_{PV}$ | $E_{cd}$ | $S_{PV}$ |
| <b>Janvier</b>   | 4,976     | 9,05     | 9.87      | 17,95    | 19,74    | 35,89    |
| <b>Février</b>   | 4,976     | 7,55     | 9.87      | 14,95    | 19,74    | 29,91    |
| <b>Mars</b>      | 4,976     | 6,55     | 9.87      | 12,99    | 19,74    | 25,97    |
| <b>Avril</b>     | 5,53      | 6,66     | 10.97     | 13,22    | 21,94    | 26,43    |
| <b>Mai</b>       | 8,3       | 9,33     | 16.45     | 18,48    | 32,9     | 36,97    |
| <b>Juin</b>      | 16,6      | 18,24    | 32.97     | 36,16    | 65,82    | 72,33    |
| <b>Juillet</b>   | 24,9      | 27,36    | 49.36     | 54,24    | 98,72    | 108,48   |
| <b>Août</b>      | 24,9      | 27,67    | 49.36     | 54,84    | 98,72    | 109,69   |
| <b>Septembre</b> | 24,9      | 30,00    | 49.36     | 59,47    | 98,72    | 118,94   |
| <b>Octobre</b>   | 9,96      | 13,46    | 19.74     | 26,68    | 39,48    | 53,35    |
| <b>Novembre</b>  | 5,53      | 9,70     | 10.97     | 19,25    | 21,94    | 38,49    |
| <b>décembre</b>  | 4,98      | 9,58     | 9.87      | 18,98    | 19,74    | 37,96    |

Les panneaux solaires dimensionnés vont être placés sur le toit du Mobilab considéré, de ce fait, la surface exploitable sera limitée. Nous calculons pour chaque Mobilab la quantité d'énergie fournie par les panneaux photovoltaïques en fonction de la surface disponible du Mobilab (tableau VI-13). Les surfaces des Mobilab sont de 14, 21 et 33 m<sup>2</sup> pour le Mobilab 1, le Mobilab 2 et le Mobilab 3 respectivement.

$$E'_{PV} = E_{PV} \times S_m \quad (\text{VI-28})$$

**Tableau VI-13: Quantité d'énergie fournie par les panneaux PV en fonction de la surface disponible du Mobilab**

| Mois             | $E_{PV}$ | Mobilab 1 |           | Mobilab 2 |           | Mobilab3 |           |
|------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|
|                  |          | $E_{cd}$  | $E'_{PV}$ | $E_{cd}$  | $E'_{pv}$ | $E_{cd}$ | $E'_{pv}$ |
| <b>Janvier</b>   | 0.55     | 4,976     | 7,7       | 9.87      | 11,55     | 19,74    | 18,15     |
| <b>Février</b>   | 0.66     | 4,976     | 9,24      | 9.87      | 13,86     | 19,74    | 21,78     |
| <b>Mars</b>      | 0.76     | 4,976     | 10,64     | 9.87      | 15,96     | 19,74    | 25,08     |
| <b>Avril</b>     | 0.83     | 5,53      | 11,62     | 10.97     | 17,43     | 21,94    | 27,39     |
| <b>Mai</b>       | 0.89     | 8,3       | 12,46     | 16.45     | 18,69     | 32,9     | 29,37     |
| <b>Juin</b>      | 0.91     | 16,6      | 12,74     | 32.97     | 19,11     | 65,82    | 30,03     |
| <b>Juillet</b>   | 0.91     | 24,9      | 12,74     | 49.36     | 19,11     | 98,72    | 30,03     |
| <b>Août</b>      | 0.90     | 24,9      | 12,6      | 49.36     | 18,9      | 98,72    | 29,7      |
| <b>Septembre</b> | 0.83     | 24,9      | 11,62     | 49.36     | 17,43     | 98,72    | 27,39     |
| <b>Octobre</b>   | 0.74     | 9,96      | 10,36     | 19.74     | 15,54     | 39,48    | 24,42     |
| <b>Novembre</b>  | 0.57     | 5,53      | 7,98      | 10.97     | 11,97     | 21,94    | 18,81     |
| <b>décembre</b>  | 0.52     | 4,98      | 7,28      | 9.87      | 10,92     | 19,74    | 17,16     |

$E_{cd}$ : Besoins énergétiques journaliers de l'aérocondenseur (kWh/jour)

$E_{PV}$ : Quantité d'énergie fournie par les panneaux (kWh/jour.m<sup>2</sup>)

$E'_{PV}$ : Energie fournie par les panneaux selon la surface du Mobilab (kWh/Jour)

$S_m$ : Surface du Mobilab (m<sup>2</sup>)

Des valeurs du tableau VI-13 nous pouvons calculer le pourcentage de couverture des besoins énergétiques de chaque Mobilab en fonction de la surface disponible et déduire ainsi l'apport énergétique à fournir pour le fonctionnement de l'aérocondenseur.

$$C_E = 100 \times \frac{E'_{PV}}{E_{cd}} \quad (\text{VI-29})$$

$$E_{AP} = E_{PV} - E'_{PV} \quad (\text{VI-30})$$

**Tableau VI-14: Couverture des besoins énergétiques de chaque Mobilab en fonction de la surface disponible**

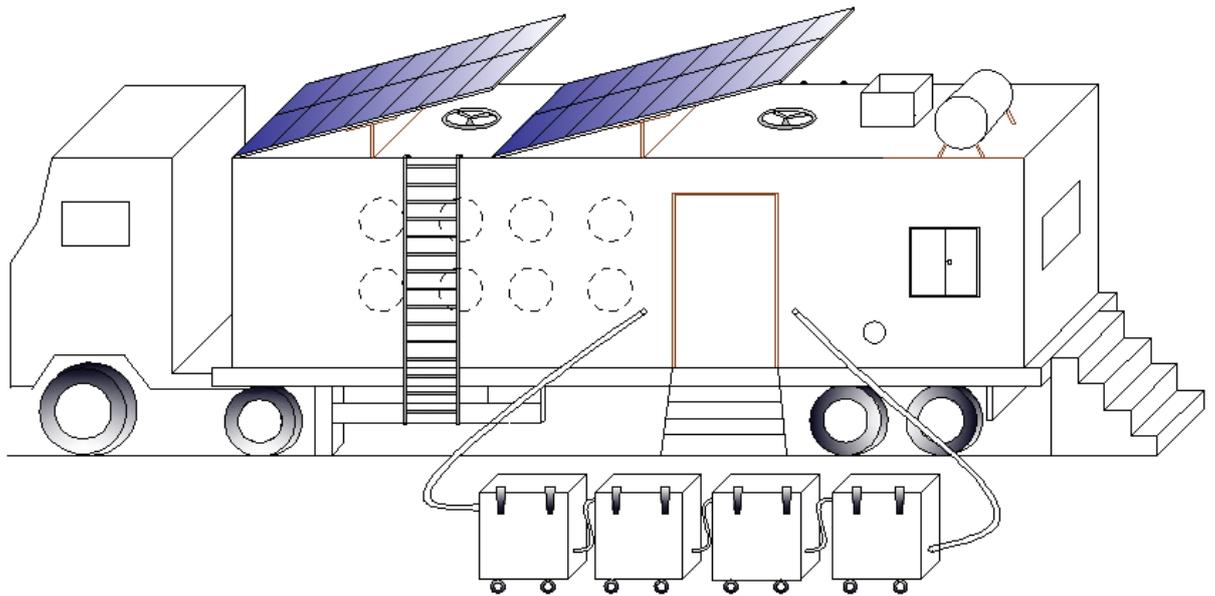
| Mois             | Mobilab 1 |          | Mobilab 2 |          | Mobilab 3 |          |
|------------------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
|                  | $C_E$     | $E_{AP}$ | $C_E$     | $E_{AP}$ | $C_E$     | $E_{AP}$ |
| <b>Janvier</b>   | 155       | 0        | 117       | 0        | 92        | 1,59     |
| <b>Février</b>   | 186       | 0        | 140       | 0        | 110       | 0        |
| <b>Mars</b>      | 214       | 0        | 162       | 0        | 127       | 0        |
| <b>Avril</b>     | 210       | 0        | 159       | 0        | 125       | 0        |
| <b>Mai</b>       | 150       | 0        | 114       | 0        | 89        | 3,53     |
| <b>Juin</b>      | 77        | 3,86     | 58        | 13,86    | 46        | 35,79    |
| <b>Juillet</b>   | 51        | 12,16    | 39        | 30,25    | 30        | 68,69    |
| <b>Août</b>      | 51        | 12,3     | 38        | 30,46    | 30        | 69,02    |
| <b>Septembre</b> | 47        | 13,28    | 35        | 31,93    | 28        | 71,33    |
| <b>Octobre</b>   | 104       | 0        | 79        | 4,2      | 62        | 15,06    |
| <b>Novembre</b>  | 144       | 0        | 109       | 0        | 86        | 3,13     |
| <b>décembre</b>  | 146       | 0        | 111       | 0        | 87        | 2,58     |

Avec :

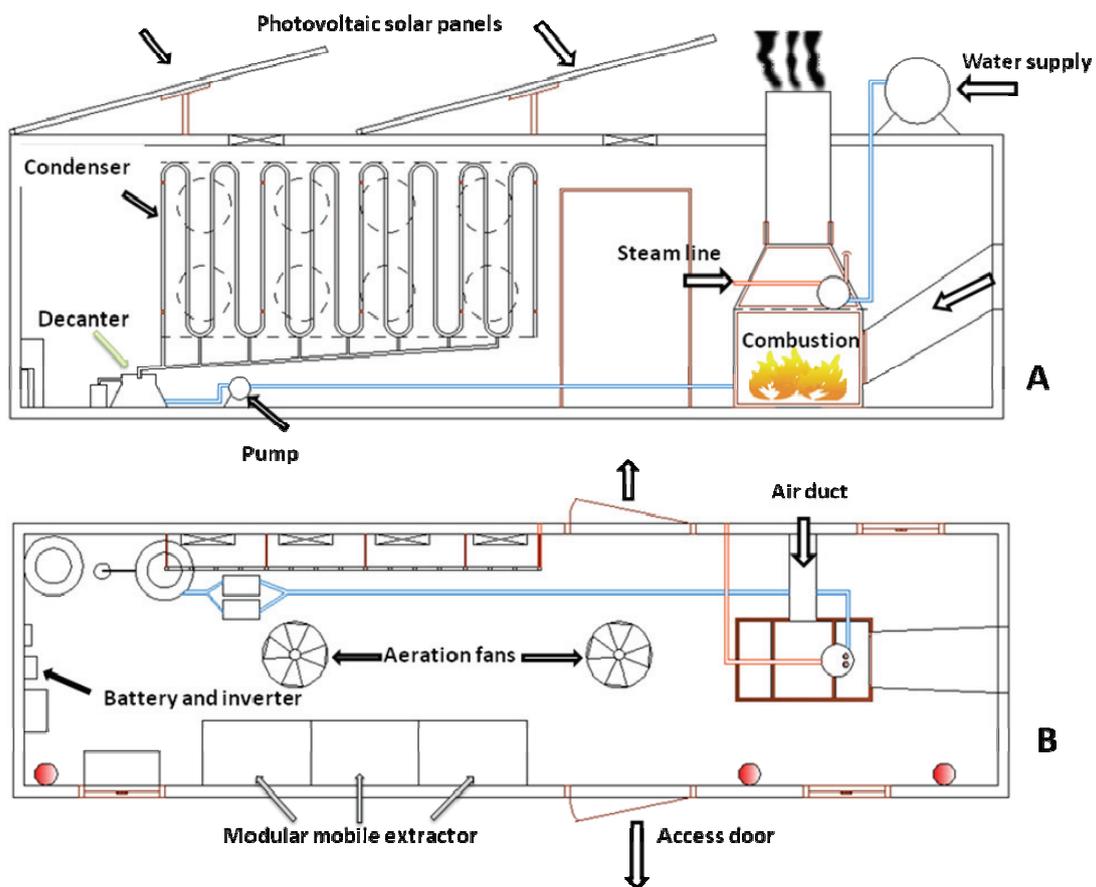
$C_E$ : couverture des besoins énergétiques de chaque Mobilab en fonction de la surface disponible en %

$E_{AP}$ : Apport énergétique kWh/jour

De l'analyse du tableau VI-14 il apparaît que l'autonomie énergétique des trois Mobilab n'est pas assurée durant tous les mois de l'année. Une énergie d'appoint est indispensable. Une estimation du coût du projet et du délai de sa récupération est nécessaire pour la durabilité de l'option technique retenue et de sa rentabilité économique. Les figures VI-8 et VI-9 représentent la configuration générale de l'unité d'extraction mobile.



**Figure VI-8** : Unité d'extraction mobile en fonctionnement



**Figure VI-9** : Configuration de l'unité d'extraction  
 A: Vue de face et B : Vue de dessus

## Conclusion

Aujourd'hui, la prise en compte des impacts environnementaux pèse de plus en plus dans les choix techniques et les développements technologiques. Dans ce contexte, l'utilisation d'un aérocondenseur dans un procédé d'extraction à la vapeur d'eau présente des atouts majeurs. Les différents calculs développés dans ce chapitre montrent la possibilité de substitution de l'eau, utilisée généralement comme fluide de refroidissement dans un condenseur, par de l'air fourni par des ventilateurs alimentés à l'énergie solaire photovoltaïque.

Dans le cas d'une projection industrielle à travers une unité mobile d'extraction, les contraintes imposées par l'installation des modules photovoltaïques en termes de surface disponible, ne permettent pas l'autonomie énergétique des trois Mobilab, durant tous les mois de l'année. Une énergie d'appoint est indispensable.

## CONCLUSION GENERALE

La présente étude a porté sur l'évaluation du potentiel d'économie d'énergie dans les procédés d'extraction et intégration des énergies renouvelables.

Les travaux de recherche entrepris au cours de ce projet de Doctorat ont permis, dans un premier temps, de mettre en lumière la composition chimique des huiles essentielles de deux espèces de la forêt méditerranéenne *Arbutus unedo* L. (Arbousier) et *Erica arborea* L. (Bruyère arborescente). Le potentiel pharmacologique des constituants volatils et non volatils de ses deux plantes a été mis en évidence à travers une large bibliographie. Le rendement en huiles essentielles des feuilles de ces deux plantes est faible il est de l'ordre de 0.14 % pour l'arbousier et de 0.31 % pour la bruyère arborescente. Ces faibles taux en huiles essentielles sont dus à l'absence de structure de stockage de ces produits du métabolisme secondaire.

L'analyse par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse de l'huile essentielle des feuilles d'Arbousier, récolté dans la forêt de Bainem (région d'Alger), a révélé une composition chimique qui diffère de celle des feuilles d'arbousier en provenance de Turquie. Pour la Bruyère arborescente, la composition chimique de ses huiles essentielles n'avait jamais été établie auparavant. Elle a été analysée pour la première fois dans le cadre de cette thèse.

Dans un deuxième temps, un procédé d'extraction par hydrodistillation en utilisant de la biomasse comme source de chaleur a été appliqué et validé pour l'extraction de l'huile essentielle d'*Arbutus unedo* L. Cette étude a porté sur la faisabilité, la conception, l'optimisation, la cinétique et la modélisation. Les résultats obtenus en termes de rendement et de temps d'extraction ont été comparés à ceux obtenus par la méthode conventionnelle. Un brûleur à biomasse équipé d'un dispositif de production de vapeur a été dimensionné et réalisé. Les différentes expérimentations de combustion réalisées ont montré que la combustion de la matière végétale rejetée par une production d'huile essentielle est en mesure de fournir la chaleur nécessaire au processus d'extraction.

L'utilisation de ces résidus de biomasse pour la production de vapeur peut apporter une contribution majeure à l'amélioration de l'efficacité énergétique de ces procédés d'extraction. En effet, au-delà des avantages environnementaux, l'utilisation de la biomasse comme combustible présente également plusieurs avantages économiques puisqu'elle permet de réutiliser les déchets, d'éviter des coûts de gestion et de faire une économie d'énergie fossile.

Les résultats de la modélisation énergétique du procédé d'extraction de l'huile essentielle d'arbousier, ont montré que la consommation énergétique en fonction de la quantité d'huile produite n'est pas à tendance linéaire. Cette consommation énergétique nous donne l'allure du coût de production pour différentes puissance de chauffage. Et c'est ainsi, qu'on se pose la question : est-il avantageux, du point de vue économique, de prolonger la durée d'extraction des huiles jusqu'à l'épuisement du végétal, sachant que la consommation d'énergie par quantité d'huile produite évolue au cours du processus d'extraction et que le prix de vente du gramme d'huile essentielle est constant?

D'autre part, dans un contexte d'économie d'eau, nous avons évalué les possibilités de substitution de l'eau utilisée généralement comme fluide de refroidissement dans un condenseur, par de l'air fourni par des ventilateurs alimentés à l'énergie solaire photovoltaïque. Les résultats obtenus sont basés uniquement sur une approche numérique en utilisant un logiciel de simulation. Les différents calculs développés ont montré que l'utilisation d'un aérocondenseur dans un procédé d'extraction à la vapeur d'eau présente des atouts majeurs en termes d'économie d'eau et d'énergie fossile.

Dans un dernier temps, nous avons présenté la possibilité de concevoir une unité d'extraction mobile, autonome en énergie et en eau. Les résultats obtenus ont montré que la puissance fournie par la combustion de la biomasse peut suffire pour produire de la vapeur nécessaire à l'extraction pour les trois Mobilab proposés. Pour ce qui est de la condensation de la vapeur, nous avons proposé un aérocondenseur dont l'air est fourni par des ventilateurs alimentés à l'énergie solaire photovoltaïque. Les contraintes imposées par l'installation des modules photovoltaïques en termes de surface disponible, ne permettent pas l'autonomie énergétique des trois Mobilab durant tous les mois de l'année. Une énergie d'appoint est indispensable.

La demande industrielle des huiles essentielles est bien réelle, et ce grâce à la production accrue de médicaments à base de plantes, de cosmétiques et de compléments alimentaires. En Algérie malgré les fortes potentialités la filière des huiles essentielles est peu développée ; elle est restée en marge de l'évolution mondiale du secteur. Pour promouvoir ce secteur émergent et profiter des opportunités offertes, la filière des huiles essentielles doit s'appuyer sur un ensemble de solutions innovantes et efficaces. Elle doit privilégier les pratiques économes en énergie fossile, en ressources naturelles et favoriser les énergies renouvelables propres et respectueuses de l'environnement.

La filière des huiles essentielles est un créneau potentiellement lucratif, il dispose de réelles perspectives de développement. C'est un secteur porteur de croissance économique ; il a l'avantage d'être une activité nécessitant une main d'œuvre disponible créatrice d'emplois. Cette activité, à forte valeur ajoutée, peut générer des revenus auprès des populations locales et permet de développer des marchés de niche. L'unité d'extraction proposée pourrait promouvoir le développement rural. En effet, une industrie plus durable pourrait permettre de réduire l'impact sur l'environnement, tout en produisant des biens et services générateurs d'emplois susceptibles de réduire la pauvreté et d'améliorer la qualité de vie d'une population en pleine expansion

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 Chemat, F. 2011 Éco-extraction du végétal. Procédés innovants et solvants alternatifs (Coll. Technique et ingénierie). *Recherche* **67**, 02.
- 2 Bertucco, A. & Franceschin, G. 2008 10 Supercritical Fluid Extraction of Medicinal and Aromatic Plants: Fundamentals and Applications. *Extraction Technologies for Medicinal and Aromatic Plants* , 169.
- 3 Vinatoru, M. 2001 An overview of the ultrasonically assisted extraction of bioactive principles from herbs. *Ultrasonics Sonochemistry* **8**, 303–313.
- 4 Mengal, P., Behn, D., Bellido, M. & Mompon, B. 1993 VMHD: extraction d'huile essentielle par micro-ondes. *Parfums, cosmétiques, arômes* , 66–67.
- 5 Pare, J. R. J., Sigouin, M. & Lapointe, J. 1991 *Microwave-assisted natural products extraction*. Google Patents. [cité 2012 oct. 23].
- 6 Munir, A. & Hensel, O. 2010 On-farm processing of medicinal and aromatic plants by solar distillation system. *Biosystems Engineering* **106**, 268–277.
- 7 Balandrin, M. F., Klocke, J. A., Wurtele, E. S. & Bollinger, W. H. 1985 Natural plant chemicals: sources of industrial and medicinal materials. *Science(Washington)* 228, 1154–1159.
- 8 Shahi, C., Leitch, M. & Laforest, S. 2009 Marketing intelligence system for small-scale essential oils industry of North-western Ontario. *Seeing the Forest Beyond the Trees*
- 9 Lubbe, A. & Verpoorte, R. 2011 Cultivation of medicinal and aromatic plants for specialty industrial materials. *Industrial Crops and Products*
- 10 National Research Development Corporation (NRDC) : Technology offer-essential oils.
- 11 Fischetti, F. 2010 Flavoring materials. *Kirk-Othmer Encycl. Chem. Technol.*
- 12 Muyima, N., Zulu, G., Bheṅgu, T. & Popplewell, D. 2002 The potential application of some novel essential oils as natural cosmetic preservatives in an aqueous cream formulation. *Flavour and fragrance journal* **17**, 258–266.
- 13 Heath, H. B. 1981 *Source book of flavors*. illustrated. Springer.
- 14 Beniamino, O. 1957 Grasse, centre mondial des matières premières aromatiques. *Revue de géographie alpine* **45**, 763-774.
- 15 Blaquiere, C., Ferrari, V. & Girod-Quilain, I. 2006 Les arômes alimentaires: les bases de la réglementation européenne. *Industries alimentaires et agricoles* **123**, 7.

- 16 Sacchetti, G., Maietti, S., Muzzoli, M., Scaglianti, M., Manfredini, S., Radice, M. & Bruni, R. 2005 Comparative evaluation of 11 essential oils of different origin as functional antioxidants, antiradicals and antimicrobials in foods. *Food chemistry* **91**, 621–632.
- 17 Burt, S. 2004 Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods—a review. *International journal of food microbiology* **94**, 223–253.
- 18 Farag, R. S., Mahmoud, E. A., Basuny, A. M. & Ali, R. F. M. Influence of crude olive leaf juice on rat liver and kidney functions. *International journal of food science & technology* **41**, 790-798.
- 19 Lee, S.-J., Umamo, K., Shibamoto, T. & Lee, K.-G. 2005 Identification of volatile components in basil (*Ocimum basilicum* L.) and thyme leaves (*Thymus vulgaris* L.) and their antioxidant properties. *Food Chemistry* **91**, 131–137.
- 20 Shan, B., Cai, Y. Z., Sun, M. & Corke, H. 2005 Antioxidant capacity of 26 spice extracts and characterization of their phenolic constituents. *Journal of agricultural and food chemistry* **53**, 7749–7759.
- 21 Viuda-Martos, M., Ruiz Navajas, Y., Sánchez Zapata, E., Fernández-López, J. & Pérez-Álvarez, J. A. 2009 Antioxidant activity of essential oils of five spice plants widely used in a Mediterranean diet. *Flavour and Fragrance Journal* **25**, 13–19.
- 22 Fisher, K. & Phillips, C. 2008 Potential antimicrobial uses of essential oils in food: is citrus the answer? *Trends in Food Science & Technology* **19**, 156–164.
- 23 F.M. Ali, R. 2011 Antioxidative Effects of Pomposia Extract, on Lipid Oxidation and Quality of Ground Beef during Refrigerated Storage. *American Journal of Food Technology* **6**, 52-62.
- 24 Miguel, M. G. 2010 Antioxidant and anti-inflammatory activities of essential oils: a short review. *Molecules* **15**, 9252–9287.
- 25 Olmedo, R. H., Nepote, V. & Grosso, N. R. 2012 Aguaribay and Cedron Essential Oils as Natural Antioxidants in Oil-Roasted and Salted Peanuts. *J Am Oil Chem Soc* **89**, 2195-2205.
- 26 Mimica-dukic, N. 2003 Aromatic plants as dietary supplements in human health. *La phytothérapie européenne* , 13–18.
- 27 Namiki, M. 1990 Antioxidants/antimutagens in food. *Crit Rev Food Sci Nutr* **29**, 273-300.
- 28 Angharad Rees, L. 2011 Face aux défis des systèmes publics de santé, quel rôle pour la médecine traditionnelle dans les pays en développement? *Hors collection* , 337-345.
- 29 Lengani, A., Lompo, L. F., Guissou, I. P. & Nikiema, J.-B. 2010 Médecine traditionnelle et maladies des reins au Burkina Faso. *Néphrologie & Thérapeutique* **6**, 35–39.

- 30 Robard, I. 2004 Plantes médicinales d'outre-mer et pharmacopées: aspects juridiques, économiques et culturels. *Phytothérapie* **2**, 16–21.
- 31 Millet, F. 2010 Les formes galéniques et les huiles essentielles. *Phytothérapie* **8**, 33–36.
- 32 Hamid, A. A., Aiyelaagbe, O. O. & Usman, L. A. 2011 Essential oils: its medicinal and pharmacological uses. *International Journal of Current Research* **3**, 086-098.
- 33 Milpied, H. 2009 *Progrès en dermato-allergologie. GERDA. Bordeaux 2009*. John Libbey Eurotext.
- 34 Bardeau, F. 2009 *Les huiles essentielles: Découvrir les bienfaits et les vertus d'une médecine ancestrale*. Fernand Lanore.
- 35 Goetz, P. 2007 Aromathérapie en pathologie digestive. *Phytothérapie* **5**, 21–24.
- 36 Organisation Mondiale de la Santé 1998 *Réglementation des médicaments à base de plantes: la situation dans le monde*.
- 37 Le Hir, A., Chaumeil, J. C. & Brossard, D. 2009 *Pharmacie galénique: bonnes pratiques de fabrication des médicaments*. Elsevier Masson.
- 38 Morel, J. M., Bruel, P., Labouyrie, V., Priolet, P. L. & Liégard, L. 2010 Intérêt des huiles essentielles GAE® dans la prise en charge des affections virales des voies respiratoires en officine. *Phytothérapie* **8**, 21–25.
- 39 Steflitsch, W. & Steflitsch, M. 2008 Clinical aromatherapy. *Journal of Men's Health* **5**, 74–85.
- 40 Menat, E. 2004 Apport des médecines naturelles pour limiter les effets secondaires des chimiothérapies et radiothérapies. *Phytothérapie* **2004**, 149–152.
- 41 Rezaie, A., Parker, R. D. & Abdollahi, M. 2007 Oxidative stress and pathogenesis of inflammatory bowel disease: an epiphenomenon or the cause? *Digestive diseases and sciences* **52**, 2015–2021.
- 42 Behl, C. 1999 Alzheimer's disease and oxidative stress: implications for novel therapeutic approaches. *Progress in neurobiology* **57**, 301–323.
- 43 Jenner, P. 2003 Oxidative stress in Parkinson's disease. *Annals of neurology* **53**, S26–S38.
- 44 Edris, A. E. 2007 Pharmaceutical and therapeutic potentials of essential oils and their individual volatile constituents: a review. *Phytotherapy Research* **21**, 308–323.
- 45 Ruberto, G. & Baratta, M. T. 2000 Antioxidant activity of selected essential oil components in two lipid model systems. *Food Chemistry* **69**, 167–174.
- 46 Lagouri, V., Blekas, G., Tsimidou, M., Kokkini, S. & Boskou, D. 1993 Composition and antioxidant activity of essential oils from oregano plants grown wild in Greece. *Zeitschrift für Lebensmitteluntersuchung und-Forschung A* **197**, 20–23.

- 47 Botsoglou, N. A., Florou-Paneri, P., Christaki, E., Giannenas, I. & Spais, A. B. 2004 Performance of rabbits and oxidative stability of muscle tissues as affected by dietary supplementation with oregano essential oil. *Archives of Animal Nutrition* **58**, 209–218.
- 48 Kim, H.-J., Chen, F., Wang, X., Chung, H. Y. & Jin, Z. 2005 Evaluation of antioxidant activity of vetiver (*Vetiveria zizanioides* L.) oil and identification of its antioxidant constituents. *Journal of agricultural and food chemistry* **53**, 7691–7695.
- 49 Kim, H.-J., Chen, F., Wu, C., Wang, X., Chung, H. Y. & Jin, Z. 2004 Evaluation of antioxidant activity of Australian tea tree (*Melaleuca alternifolia*) oil and its components. *Journal of agricultural and food chemistry* **52**, 2849–2854.
- 50 Tepe, B. 2008 Antioxidant potentials and rosmarinic acid levels of the methanolic extracts of *Salvia virgata* (Jacq), *Salvia staminea* (Montbret & Aucher ex Benth) and *Salvia verbenaca* (L.) from Turkey. *Bioresource technology* **99**, 1584–1588.
- 51 Tepe, B., Donmez, E., Unlu, M., Candan, F., Daferera, D., Vardar-Unlu, G., Polissiou, M. & Sokmen, A. 2004 Antimicrobial and antioxidative activities of the essential oils and methanol extracts of *Salvia cryptantha* (Montbret et Aucher ex Benth.) and *Salvia multicaulis* (Vahl). *Food Chemistry* **84**, 519–525.
- 52 Zhang, H., Chen, F., Wang, X. & Yao, H.-Y. 2006 Evaluation of antioxidant activity of parsley (*Petroselinum crispum*) essential oil and identification of its antioxidant constituents. *Food research international* **39**, 833–839.
- 53 Hart, P. H., Brand, C., Carson, C. F., Riley, T. V., Prager, R. H. & Finlay-Jones, J. J. 2000 Terpinen-4-ol, the main component of the essential oil of *Melaleuca alternifolia* (tea tree oil), suppresses inflammatory mediator production by activated human monocytes. *Inflammation Research* **49**, 619–626.
- 54 Souza, M. C., Siani, A. C., Ramos, M. F. S., Menezes-de-Lima Jr, O. & Henriques, M. 2003 Evaluation of anti-inflammatory activity of essential oils from two Asteraceae species. *Die Pharmazie-An International Journal of Pharmaceutical Sciences* **58**, 582–586.
- 55 Inouye, S. & Abe, S. 2007 Nouvelle approche de l'aromathérapie anti-infectieuse. *Phytothérapie* **5**, 2-4.
- 56 Ait Mbarek, L. et al. 2007 Anti-tumor properties of blackseed (*Nigella sativa* L.) extracts. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research* **40**, 839–847.
- 57 Randhawa, M. A. & Alghamdi, M. S. 2011 Anticancer activity of *Nigella sativa* (black seed)—A review. *The American Journal of Chinese Medicine* **39**, 1075–1091.
- 58 Sousa, A. C., Gattass, C. R., Alviano, D. S., Alviano, C. S., Blank, A. F. & Alves, P. B. 2004 *Melissa officinalis* L. essential oil: antitumoral and antioxidant activities. *Journal of pharmacy and pharmacology* **56**, 677–681.
- 59 Billerbeck, V.-G. 2008 Huiles essentielles et bactéries résistantes aux antibiotiques. *Phytothérapie* **5**, 249-253.

- 60 Kempf, M., Eveillard, M., Kowalczyk, F., Rossines, E., Panhelleux, G. & Joly-Guillou, M. L. 2011 Étude de la sensibilité de 224 bactéries isolées d'infections hospitalières vis-à-vis des composés JCA 250 et JCA 251 à base d'huiles essentielles issus de la recherche Aroma Technologies. *Pathologie Biologie* **59**, 39–43.
- 61 May, J., Chan, C. H., King, A., Williams, L. & French, G. L. 2000 Time–kill studies of tea tree oils on clinical isolates. *Journal of antimicrobial chemotherapy* **45**, 639–643.
- 62 Tohidpour, A., Sattari, M., Omidbaigi, R., Yadegar, A. & Nazemi, J. 2010 Antibacterial effect of essential oils from two medicinal plants against Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA). *Phytomedicine* **17**, 142–145.
- 63 Fisher, K. & Phillips, C. 2009 In vitro inhibition of vancomycin-susceptible and vancomycin-resistant *Enterococcus faecium* and *E. faecalis* in the presence of citrus essential oils. *British journal of biomedical science* **66**, 180.
- 64 Shin, S. & Kim, J. H. 2005 In vitro inhibitory activities of essential oils from two Korean *Thymus* species against antibiotic-resistant pathogens. *Archives of pharmacal research* **28**, 897–901.
- 65 Barel, S., Segal, R. & Yashphe, J. 1991 The antimicrobial activity of the essential oil from *Achillea fragrantissima*. *Journal of ethnopharmacology* **33**, 187–191.
- 66 Ünlü, M., Daferera, D., Dönmez, E., Polissiou, M., Tepe, B. & Sökmen, A. 2002 Compositions and the in vitro antimicrobial activities of the essential oils of *Achillea setacea* and *Achillea teretifolia* (Compositae). *Journal of ethnopharmacology* **83**, 117–121.
- 67 Candan, F., Unlu, M., Tepe, B., Daferera, D., Polissiou, M., Sökmen, A. & Akpulat, H. A. 2003 Antioxidant and antimicrobial activity of the essential oil and methanol extracts of *Achillea millefolium* subsp. *millefolium* Afan. (Asteraceae). *Journal of Ethnopharmacology* **87**, 215–220.
- 68 Huang, Y. & Ho, S. H. 1998 Toxicity and antifeedant activities of cinnamaldehyde against the grain storage insects, *Tribolium castaneum* (Herbst) and *Sitophilus zeamais* Motsch. *Journal of Stored Products Research* **34**, 11–17.
- 69 Huang, Y., Ho, S.-H., Lee, H.-C. & Yap, Y.-L. 2002 Insecticidal properties of eugenol, isoeugenol and methyleugenol and their effects on nutrition of *Sitophilus zeamais* Motsch. (Coleoptera: Curculionidae) and *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal of Stored Products Research* **38**, 403–412.
- 70 Liu, Z. L. & Ho, S. H. 1999 Bioactivity of the essential oil extracted from *Evodia rutaecarpa* Hook f. et Thomas against the grain storage insects, *Sitophilus zeamais* Motsch. and *Tribolium castaneum* (Herbst). *Journal of Stored Products Research* **35**, 317–328.
- 71 Ayvaz, A., Sagdic, O., Karaborklu, S. & Ozturk, I. 2010 Insecticidal activity of the essential oils from different plants against three stored-product insects. *Journal of insect science* **10**.

- 72 Miresmailli, S., Bradbury, R. & Isman, M. B. 2006 Comparative toxicity of *Rosmarinus officinalis* L. essential oil and blends of its major constituents against *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae) on two different host plants. *Pest management science* **62**, 366–371.
- 73 Tunc, I., Berger, B. M., Erler, F. & Da\u015ful, F. 2000 Ovicidal activity of essential oils from five plants against two stored-product insects. *Journal of Stored Products Research* **36**, 161–168.
- 74 Ngamo, L. S. T. & Hance, T. 2007 Diversit  des ravageurs des denr es et méthodes alternatives de lutte en milieu tropical. *Tropicultura* **25**, 215–220.
- 75 Koul, O., Walia, S. & Dhaliwal, G. 2008 Essential oils as green pesticides: potential and constraints. *Biopestic. Int* **4**, 63–84.
- 76 Dubey, N., Srivastava, B. & Kumar, A. 2008 Current status of plant products as botanical pesticides in storage pest management. *Journal of Biopesticides* **1**, 182–186.
- 77 Isman, M. B. 2000 Plant essential oils for pest and disease management. *Crop protection* **19**, 603–608.
- 78 B gin, D. & G rin, M. 2000 La substitution des solvants par le d-limonène. *Health (NIOSH)*
- 79 Iqbal, M. 1993 International trade in non-wood forest products: An overview. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*
- 80 Ba er, K. H. C. & Buchbauer, G. 2009 *Handbook of Essential Oils: Science, Technology, and Applications*. CRC.
- 81 Secretaria de Comercio y Relaciones econ micas internacionales 2004 Análisis de la tendencia del mercado internacional de aceites esenciales, 24.
- 82 Comtrade, U. N. 2007 United Nations commodity trade statistics database. URL: <http://comtrade.un.org>
- 83 Lawrence, B. M. 2009 A preliminary report on the world production of some selected essential oils and countries. *Perfumer & Flavorist* **34**, 38–44.
- 84 Quezel, P. & Santa, S. 1962 *Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales*. Editions du Centre National de la recherche scientifique.
- 85 Zeraia, L. 1983 Protection de la flore: liste et localisation des espèces rares, très rares et rarissimes d'Algérie. , 124.
- 86 INRAA 2006 Rapport national sur l'état des ressources phytogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture.
- 87 International Union for Conservation of Nature (IUCN) 1996 Programme de la biodiversité en Afrique du Nord - Phase I. , 80.

- 88 Fourment, Roques & Comité de contrôle de la production de la répartition et de la vente des plantes médicinales et aromatiques d'Algérie (Alger) 1942 *Répertoire des plantes médicinales et aromatiques d'Algérie*. Alger:
- 89 International Union for Conservation of Nature (IUCN) 2003 Programme de la biodiversité en Afrique du Nord - Phase III.
- 90 MATE-GEF/PNUD 2003 Evaluation des besoins en matière de renforcement des capacités nécessaires à la conservation et à l'utilisation durable de la biodiversité importante pour l'agriculture. , 79.
- 91 Direction Générale des Forêts 2006 Recensement des plantes médicinales.
- 92 M.A.D.R / D.S.A.S.I /S.D.S.A 2001 Commerce extérieur agricole.
- 93 M.A.D.R / D.S.A.S.I /S.D.S.A 2002 Commerce extérieur agricole.
- 94 M.A.D.R / D.S.A.S.I /S.D.S.A 2003 Commerce extérieur agricole.
- 95 M.A.D.R / D.S.A.S.I /S.D.S.A 2004 Commerce extérieur agricole.
- 96 M.A.D.R / D.S.A.S.I /S.D.S.A 2005 Commerce extérieur agricole.
- 97 M.A.D.R / D.S.A.S.I /S.D.S.A 2006 Commerce extérieur agricole.
- 98 M.A.D.R / D.S.A.S.I /S.D.S.A 2007 Commerce extérieur agricole.
- 99 M.A.D.R / D.S.A.S.I /S.D.S.A 2008 Commerce extérieur agricole.
- 100 Roulier, G. & Roulier, A. 2005 *Les huiles essentielles pour votre santé: guide pratique d'aromathérapie et d'aromachologie: propriétés, indications et conseils d'utilisation des essences de plantes*. Dangles.
- 101 Grosjean, N. 2010 *Les huiles essentielles*. Eyrolles.
- 102 International Trade Centre UNCTAD/WTO 2006 Marketing Manual and Web Directory for Organic Spices, Culinary Herbs and Essential Oils.
- 103 Harborne, J. B. 1987 Chemical signals in the ecosystem. *Annals of Botany* **60**, 39.
- 104 Başer, K. H. C. & Demirci, F. 2007 4 Chemistry of Essential Oils. *Flavours and fragrances: chemistry, bioprocessing and sustainability* , 43.
- 105 Bruneton, J. 1993 Pharmacognosie: phytochimie, plantes médicinales (2 éd.). Paris: Tec & Doc Lavoisier
- 106 König, W. A., Rieck, A., Hardt, I., Gehrecke, B., Kubeczka, K. H. & Muhle, H. 2005 Enantiomeric composition of the chiral constituents of essential oils. Part 2: Sesquiterpene hydrocarbons. *Journal of high resolution chromatography* **17**, 315–320.
- 107 Willem, J. P. 2002 *Les huiles essentielles: médecine d'avenir*. Éd. du Dauphin.

- 108 Guenther, E. 1948 *The Essential Oils*. D. Van Nostrand Company, Inc. D. Van Nostrand Co., Inc. New York.
- 109 Gilly, G. 2005 *Les plantes aromatiques et les huiles essentielles à Grasse: botanique, culture, chimie, production et marché*. Editions L'Harmattan.
- 110 Garner, J. 1996 *Huiles essentielles*. Ed. Techniques Ingénieur.
- 111 Bakkali, F., Averbeck, S., Averbeck, D. & Idaomar, M. 2008 Biological effects of essential oils-a review. *Food and chemical toxicology* **46**, 446–475.
- 112 Lamarti, A., Badoc, A., Deffieux, G. & Carde, J. 1994 Biogénèse des Monoterpènes–II–La chaîne isoprénique. *Bull. Soc. Pharm. Bordeaux* **133**, 79–99.
- 113 Degenhardt, J., Kollner, T. G. & Gershenzon, J. 2009 Monoterpene and sesquiterpene synthases and the origin of terpene skeletal diversity in plants. *Phytochemistry* **70**, 1621–1637.
- 114 Fahlbusch, K. G., Hammerschmidt, F. J., Panten, J., Pickenhagen, W., Schatkowski, D., Bauer, K., Garbe, D. & Surburg, H. 2002 Flavors and fragrances. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*
- 115 Kalemba, D. & Kunicka, A. 2003 Antibacterial and antifungal properties of essential oils. *Current Medicinal Chemistry* **10**, 813–829.
- 116 Zhiri, A. & Baudoux, D. 2005 *Huiles essentielles chémotypées et leurs synergies*. Edition Inspir Development
- 117 Godefroot, M., Sandra, P. & Verzele, M. 1981 New method for quantitative essential oil analysis. *J. Chromatogr. A* **203**, 325–335.
- 118 Garneau, F. X., Collin, G. J. 2005 *Huile essentielle: de la plante à la commercialisation: manuel pratique*. Corporation Laseve, Université du Québec à Chicoutimi.
- 119 Handa, S. 2008 1 An Overview of Extraction Techniques for Medicinal and Aromatic Plants. *Extraction Technologies for Medicinal and Aromatic Plants* , 21.
- 120 Von Rechenberg, C. 1910 *Theorie der gewinnung und trennung der ätherischen öle durch destillation:(grundzüge einer allgemeinen destillationslehre)*. Staackmann.
- 121 Lagunez Rivera, L. 2006 Etude de l'extraction de métabolites secondaires de différentes matières végétales en réacteur chauffé par induction thermomagnétique directe. Thèse de doctorat.
- 122 Tandon, S. 2008. 7 Distillation Technology for Essential Oils. *Extraction Technologies for Medicinal and Aromatic Plants* , 115.
- 123 Richard, H. & Multon, J. L. 1992 *Les arômes alimentaires*. Tec & Doc-Lavoisier.
- 124 Anizon, J. Y., Lemaire, B. & Surbled, M. 2003 Extraction assistée par micro-ondes. *Techniques de l'ingénieur. Agroalimentaire* **2**, F3060–1.

- 125 Sahraoui, N., Vian, M. A., Bornard, I., Boutekedjiret, C. & Chemat, F. 2008 Improved microwave steam distillation apparatus for isolation of essential oils:: Comparison with conventional steam distillation. *Journal of Chromatography A* **1210**, 229–233.
- 126 Craveiro, A., Matos, F., Alencar, J. & Plumel, M. 1989 Microwave oven extraction of an essential oil. *Flavour and fragrance journal* **4**, 43–44.
- 127 Mengal, P. & Mompon, B. 2006 Method and Plant for Solvent-Free Microwave Extraction of Natural Products. U.S. Patent No 7,001,629,
- 128 Lucchesi, M. E., Smadja, J., Bradshaw, S., Louw, W. & Chemat, F. 2007 Solvent free microwave extraction of *Elletaria cardamomum* L.: A multivariate study of a new technique for the extraction of essential oil. *Journal of Food Engineering* **79**, 1079–1086.
- 129 Chemat, F., Smadja, J. & Lucchesi, M. E. 2003 Solvent less microwave extraction of natural plants. *European Patent Application. EP* **1**, A1.
- 130 Chemat, F., Lucchesi, M. E., Smadja, J., Favretto, L., Colnaghi, G. & Visinoni, F. 2006 Microwave accelerated steam distillation of essential oil from lavender: A rapid, clean and environmentally friendly approach. *Analytica Chimica Acta* **555**, 157–160.
- 131 Ferhat, M. A., Meklati, B. Y., Smadja, J. & Chemat, F. 2006 An improved microwave Clevenger apparatus for distillation of essential oils from orange peel. *Journal of Chromatography A* **1112**, 121–126.
- 132 Delazar, A., Nahar, L., Hamedeyazdan, S. & Sarker, S. D. 2012 Microwave-assisted extraction in natural products isolation. *Natural Products Isolation* **864**, 89–115.
- 133 Wang, Z. et al. 2006 Improved solvent-free microwave extraction of essential oil from dried *Cuminum cyminum* L. and *Zanthoxylum bungeanum* Maxim. *Journal of Chromatography A* **1102**, 11–17.
- 134 Chemat, F., Vian, M. & Visinoni, F. 2008 Microwave hydrodiffusion for isolation of natural products.. European Patent No. EP 1955749. Munich, Germany:
- 135 Chemat, F. & Sawamura, M. 2010 Techniques for oil extraction. *Citrus Essential Oils: Flavor and Fragrance* , 9–36.
- 136 Vian, M. A., Fernandez, X., Visinoni, F. & Chemat, F. 2008 Microwave hydrodiffusion and gravity, a new technique for extraction of essential oils. *Journal of Chromatography A* **1190**, 14–17.
- 137 Munir, A. & Hensel, O. 2009 Biomass energy utilization in solar distillation system for essential oils extraction from herbs. *Conference of international research on food security, natural resource management and rural development, University of Hamburg.*
- 138 Munir, A. & Hensel, O. 2010 Investigation of optimal thermal parameters for essential oils extraction using laboratory and solar distillation systems. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* **12**.

- 139 Munir, A. & Hensel, O. Experimental results of essential oils extraction from herbs using solar energy.
- 140 Munir, A. Design, development and modeling of a solar distillation system for the processing of medicinal and aromatic plants.
- 141 Dupont, F. *Essential oil extraction from herbs using solar energy*. Spain.
- 142 Romero, E., Fuentes, S., Quiroga, V., Garcia, V., Iriarte, A. & Saravia, L. 2007 Obtención de aceite esencial de comino utilizando concentradores solares. *Revista de la Asociación Argentina de Energías Renovables* **11**, 17–22.
- 143 Romero, E., Bistoni, S. & Iriarte, A. 2011 Destilador de aceite esencial de comino con energía solar térmica. ensayos preliminares. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **15**.
- 144 De Silva, T. 1997 Industrial utilization of medicinal plants in developing countries. *Medicinal plants for forest conservation and health care*. FAO, Rome , 34–44.
- 145 Ames, G. R. & Matthews, W. S. A. 1968 The distillation of essential oils. *Tropical Science* **10**, 136–48.
- 146 Guenther, E. 1952 Recent developments in essential oil production. *Economic Botany* **6**, 355–378.
- 147 Direction Générale des Forêts (DGF) 2007 Aménagement de la forêt domaniale de Bainem et de la forêt de 19 juin.
- 148 Emberger, L. 1955 Une classification biogéographique des climats. *Naturalia Monspeliensa* **7**, 3–43.
- 149 Emberger, L. 1930 *La végétation de la région méditerranéenne: essai d'une classification des groupements végétaux*. Librairie générale de l'enseignement.
- 150 Beloued, A. 1998 *Plantes médicinales d'Algérie*. Office Des.Publications
- 151 Baba Aissa, F. 1999 Encyclopédie des plantes utiles, Flore d'Algérie et du Maghreb. *Librairie moderne-Rouiba* , 194–231.
- 152 Dessins-gravures de fleurs de Méditerranée. *Education environnement, nature et patrimoine*.
- 153 Oddo, L. P., Piazza, M., Sabatini, A. & Accorti, M. 1995 Characterization of unifloral honeys. *Apidologie* **26**, 453–465.
- 154 Berrahmouni, N., Escuté, X., Regato, P. & Stein, C. 2008 L'univers du Liège, une source de richesses pour la nature et les hommes: Exemples méditerranéens.
- 155 Pallauf, K., Rivas-Gonzalo, J., del Castillo, M., Cano, M. & de Pascual-Teresa, S. 2008 Characterization of the antioxidant composition of strawberry tree (*Arbutus unedo* L.) fruits. *Journal of Food Composition and Analysis* **21**, 273–281.

- 156 Pabuccuoglu, A., Kivcak, B., Bas, M. & Mert, T. 2003 Antioxidant activity of *Arbutus unedo* leaves. *Fitoterapia* **74**, 597–599.
- 157 Tavares, L., Fortalezas, S., Carrilho, C., McDougall, G., Stewart, D., Ferreira, R. & Santos, C. 2010 Antioxidant and antiproliferative properties of strawberry tree tissues. *Journal of Berry Research* **1**, 3–12.
- 158 Oliveira, I. V. 2010 Caracterização fitoquímica de folhas e frutos de *Arbutus unedo* L. Bragança: ESA. Dissertação de Mestrado em Qualidade e Segurança Alimentar.
- 159 Oliveira, I., Baptista, P., Malheiro, R., Casal, S., Bento, A. & Pereira, J. A. 2011 Influence of strawberry tree (*Arbutus unedo* L.) fruit ripening stage on chemical composition and antioxidant activity. *Food Research International*
- 160 El-Hilaly, J., Hmamouchi, M. & Lyoussi, B. 2003 Ethnobotanical studies and economic evaluation of medicinal plants in Taounate province (Northern Morocco). *Journal of ethnopharmacology* **86**, 149–158.
- 161 Dib, M. E. A., Allali, H., Bendiabdellah, A., Meliani, N. & Tabti, B. 2011 Antimicrobial activity and phytochemical screening of *Arbutus unedo* L. *Journal of Saudi Chemical Society*
- 162 Orak, H. H., Yagar, H., Isbilir, S. S., Demirci, A. Ş., Gümüş, T. & Ekinci, N. 2011 Evaluation of antioxidant and antimicrobial potential of strawberry tree (*Arbutus Unedo* L.) leaf. *Food Science and Biotechnology* **20**, 1249–1256.
- 163 Cornara, L., La Rocca, A., Marsili, S. & Mariotti, M. 2009 Traditional uses of plants in the Eastern Riviera (Liguria, Italy). *Journal of ethnopharmacology* **125**, 16–30.
- 164 Ziyat, A., Legssyer, A., Mekhfi, H., Dassouli, A., Serhrouchni, M. & Benjelloun, W. 1997 Phytotherapy of hypertension and diabetes in oriental Morocco. *Journal of Ethnopharmacology* **58**, 45–54.
- 165 Bnouham, M., Merhfour, F., Legssyer, A., Mekhfi, H., Maallem, S. & Ziyat, A. 2007 Antihyperglycemic activity of *Arbutus unedo*, *Ammoides pusilla* and *Thymelaea hirsuta*. *Die Pharmazie-An International Journal of Pharmaceutical Sciences* **62**, 630–632.
- 166 Mariotto, S., Esposito, E., Di Paola, R., Ciampa, A., Mazzon, E., de Prati, A. C., Darra, E., Vincenzi, S. & Cucinotta, G. 2008 Protective effect of *Arbutus unedo* aqueous extract in carrageenan-induced lung inflammation in mice. *Pharmacol. Res.* **57**, 110–124.
- 167 El Haouari, M., López, J. J., Mekhfi, H., Rosado, J. A. & Salido, G. M. 2007 Antiaggregant effects of *Arbutus unedo* extracts in human platelets. *Journal of ethnopharmacology* **113**, 325–331.
- 168 Ziyat, A. & Boussairi, E. H. 1998 Cardiovascular effects of *Arbutus unedo* L. in spontaneously hypertensive rats. *Phytotherapy Research* **12**, 110–113.
- 169 Afkir, S., Nguelefack, T. B., Aziz, M., Zoheir, J., Cuisinaud, G., Bnouham, M., Mekhfi, H., Legssyer, A., Lahlou, S. & Ziyat, A. 2008 *Arbutus unedo* prevents cardiovascular and morphological alterations in L-NAME-induced hypertensive rats:: Part I: Cardiovascular and renal hemodynamic effects of *Arbutus unedo* in L-NAME-induced hypertensive rats. *J. Ethnopharmacol.* **116**, 288–295.

- 170 Mekhfi, H., Haouari, M. E., Legssyer, A., Bnouham, M., Aziz, M., Atmani, F., Remmal, A. & Ziyyat, A. 2004 Platelet anti-aggregant property of some Moroccan medicinal plants. *Journal of ethnopharmacology* **94**, 317–322.
- 171 Carcache-Blanco, E. J., Cuendet, M., Park, E. J., Su, B. N., Rivero-Cruz, J. F., Farnsworth, N. R., Pezzuto, J. M. & Kinghorn, A. D. 2006 Potential cancer chemopreventive agents from *Arbutus unedo*. *Natural Product Research* **20**, 327–334.
- 172 Lahsissene, H., Kahouadji, A., Tijane, M. & Hseini, S. 2009 *Catalogue des plantes medicinales utilisées dans la region de Zaër (Maroc Occidental)*. Lejeunia.
- 173 Tuzlaçl, E. & Aymaz, P. I. E. 2001 Turkish folk medicinal plants, Part IV: Gönen (Ballkesir) 1. *Fitoterapia* **72**, 323–343.
- 174 Le Floch, E. 1983 *Contribution à une étude ethnobotanique de la flore tunisienne*. Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique.
- 175 Mendes, L., de Freitas, V., Baptista, P. & Carvalho, M. 2011 Comparative antihemolytic and radical scavenging activities of strawberry tree (*Arbutus unedo* L.) leaf and fruit. *Food and Chemical Toxicology*
- 176 Malheiro, R., Sá, O., Pereira, E., Aguiar, C., Baptista, P. & Pereira, J. A. 2011 *Arbutus unedo* L. leaves as source of phytochemicals with bioactive properties. *Industrial Crops and Products*
- 177 Kivçak, B., Mert, T., Ertabaklar, H., Balçioğlu, İ. C. & Töz, S. Ö. 2009 In vitro Activity of *Arbutus unedo* Against *Leishmania tropica* Promastigotes. *In vitro* **33**, 114–115.
- 178 Ertabaklar, H., Kivçak, B., Mert, T. & Töz, S. Ö. 2009 In vitro Activity of *Arbutus unedo* Leaf Extracts against *Trichomonas vaginalis* Trophozoites. *Türkiye parazitolojii dergisi/Türkiye Parazitoloji Derneği= Acta parasitologica Turcica/Turkish Society for Parasitology* **33**, 263.
- 179 Kivçak, B., Mert, T., Demirci, B. & Baser, K. 2001 Composition of the essential oil of *Arbutus unedo*. *Chemistry of natural compounds* **37**, 445–446.
- 180 Kivçak, B. & Mert, T. 2001 Quantitative determination of [alpha]-tocopherol in *Arbutus unedo* by TLC-densitometry and colorimetry. *Fitoterapia* **72**, 656–661.
- 181 Ibanez, E., Lopez-Sebastian, S., Ramos, E., Tabera, J. & Reglero, G. 1998 Analysis of volatile fruit components by headspace solid-phase microextraction. *Food Chemistry* **63**, 281–286.
- 182 Gaspar, E. M. S. M., das Neves, H. J. C. & Noronha, J. P. 1997 Application of HPLC-PBMS to the identification of unknown components in a triterpenoid fraction of *Arbutus unedo* fruits. *Journal of High Resolution Chromatography* **20**, 417–420.

- 183 Andrade, D., Gil, C., Breitenfeld, L., Domingues, F. & Duarte, A. P. 2009 Bioactive extracts from *Cistus ladanifer* and *Arbutus unedo* L. *Industrial Crops and Products* **30**, 165–167.
- 184 Males, Z., Plazibat, M., Vundać, V. & Zuntar, I. 2006 Qualitative and quantitative analysis of flavonoids of the strawberry tree-*Arbutus unedo* L.(Ericaceae). *Acta pharmaceutica (Zagreb, Croatia)* **56**, 245.
- 185 Pavlović, D. R., Branković, S., Kovačević, N., Kitić, D. & Veljković, S. 2011 Comparative Study of Spasmolytic Properties, Antioxidant Activity and Phenolic Content of *Arbutus unedo* from Montenegro and Greece. *Phytotherapy Research*
- 186 Fiorentino, A., Castaldi, S., D'ABROSCA, B., Natale, A., Carfora, A., Messere, A. & Monaco, P. 2007 Polyphenols from the hydroalcoholic extract of *Arbutus unedo* living in a monospecific Mediterranean woodland. *Biochemical systematics and ecology* **35**, 809–811.
- 187 Pavlovic, R., Lakusicc, B., Doslov-Kokorus, Z. & Kovacevic, N. 2009 Arbutin content and antioxidant activity of some Ericaceae species. *Die Pharmazie-An International Journal of Pharmaceutical Sciences* **64**, 656–659.
- 188 Pawlowska, A. M., De Leo, M. & Braca, A. 2006 Phenolics of *Arbutus unedo* L.(Ericaceae) fruits: identification of anthocyanins and gallic acid derivatives. *Journal of agricultural and food chemistry* **54**, 10234–10238.
- 189 Ayaz, F., Kucukislamoglu, M. & Reunanen, M. 2000 Sugar, non-volatile and phenolic acids composition of strawberry tree (*Arbutus unedo* L. var. *ellipsoidea*) fruits. *Journal of Food Composition and Analysis* **13**, 171–177.
- 190 Barros, L., Carvalho, A. M., Morais, J. S. & Ferreira, I. C. F. R. 2010 Strawberry-tree, blackthorn and rose fruits: Detailed characterisation in nutrients and phytochemicals with antioxidant properties. *Food Chemistry* **120**, 247–254.
- 191 Alarcao-E-Silva, M., Leitão, A., Azinheira, H. & Leitão, M. 2001 The arbutus berry: studies on its color and chemical characteristics at two mature stages. *Journal of Food Composition and Analysis* **14**, 27–35.
- 192 Rameau, J. C., Mansion, D. & Dumé, G. 2008 *Flore forestière française: Région méditerranéenne*. Forêt privée française.
- 193 Darias, V., Martin-Herrera, D., Abdala, S. & De la Fuente, D. 2001 Plants used in urinary pathologies in the Canary islands. *Pharmaceutical biology* **39**, 170–180.
- 194 Antonone, R., Simone, F. D., Morrica, P. & Ramundo, E. 1988 Traditional phytotherapy in the Roccamonfina volcanic group, Campania, Southern Italy. *Journal of ethnopharmacology* **22**, 295–306.
- 195 Beghalia, M., Ghalem, S., Allali, H., Belouatek, A. & Marouf, A. 2008 Inhibition of calcium oxalate monohydrate crystal growth using Algerian medicinal plants. *J Med Plants Res* **2**, 66–70.
- 196 Gunther, R. T. & John, G. 1959 *The Greek Herbal of Dioscorides*. Hafner New York.

- 197 Ay, M., Bahadori, F., Öztürk, M., Kolak, U. & Topçu, G. 2007 Antioxidant activity of *Erica arborea*. *Fitoterapia* **78**, 571–573.
- 198 Akkol, E. K., Yesilada, E. & Güvenç, A. 2008 Valuation of anti-inflammatory and antinociceptive activities of *Erica* species native to Turkey. *Journal of ethnopharmacology* **116**, 251–257.
- 199 Nazemiyeh, H., Bahadori, F., Delazar, A., Ay, M., Topcu, G., Nahar, L., Majinda, R. & Sarker, S. 2008 Antioxidant phenolic compounds from the leaves of *Erica arborea* (Ericaceae). *Natural Product Research* **22**, 1385–1392.
- 200 Nayebi, A. M., Nazemiyeh, H., Omidbakhsh, R. & Çobanoğlu, S. 2008 Analgesic effect of the methanol extract of *Erica arborea* (L.) in mice using formalin test. *DARU* **16**, 229–232.
- 201 Pavlovic, R., Lakušić, B., Došlov-Kokoruš, Z. & Kovacevic, N. 2009 Arbutin content and antioxidant activity of some Ericaceae species. *Pharmazie* **64**, 656–659.
- 202 Nazemiyeh, H., Bahadori, F., Delazar, A., Ay, M., Topcu, G., Kolak, U., Nahar, L., Auzie, A. & Sarker, S. 2008 Tricetin 4'-O-\alpha-L-rhamnopyranoside: A new flavonoid from the aerial parts of *Erica arborea*. *Chemistry of Natural Compounds* **44**, 174–177.
- 203 Khasan, Y. Y., Zorina, A., Matyukhina, L. & Saltykova, I. 1977 Triterpenoids of some plants growing in Siberia. *Chemistry of Natural Compounds* **13**, 109–109.
- 204 Demirkiran, O., Topçu, G., Bahadori, F., Ay, M., Nazemiyeh, H. & Choudhary, I. 2010 Two New Phenylpropanoid Glycosides from the Leaves and Flowers of *Erica arborea*. *Helvetica Chimica Acta* **93**, 77–83.
- 205 Harborne, J. & Williams, C. A. 1969 The identification of orcinol in higher plants in the family Ericaceae. *Phytochemistry* **8**, 2223–2226.
- 206 Frutos, P., Hervás, G., Ramos, G., Giráldez, F. J. & Mantecón, A. 2002 Condensed tannin content of several shrub species from a mountain area in northern Spain, and its relationship to various indicators of nutritive value. *Animal feed science and technology* **95**, 215–226.
- 207 Clevenger, J. 1928 Apparatus for the determination of volatile oil. *Journal of the American Pharmaceutical Association* **17**, 345–349.
- 208 Gueoguiev, E. 1980 Technologie des produits aromatiques naturels. *Ed. de l'Institut Supérieur de Technologie Alimentaire, Plovdiv*
- 209 Bouchonnet, S. & Libong, D. 2004 Le couplage chromatographie en phase gazeuse-spectrométrie de masse. *ACTUALITE CHIMIQUE*, 7–14.
- 210 Tranchant, J. 1995 *Manuel pratique de chromatographie en phase gazeuse*. Masson.
- 211 Paolini, J. 2005 Caractérisation des huiles essentielles par CPG/Ir, CPG/SM (IE et IC) et RMN du carbone-13 de *Cistus albidus* et de deux Asteraceae endémiques de Corse: *Eupatorium cannabinum* subsp. *corsicum* et *Doronicum corsicum*.

- 212 Jennings, W., & Shibamoto, T. 1980 *Qualitative analysis of flavor and fragrance volatiles by glass capillary gas chromatography*. New York: Academic Press.
- 213 Lourici, L. & Messadi, D. 2009 Calcul Des Indices De Retention En Chromatographie Gazeuse a Programmation Lineaire De Temperature. *Lebanese Science Journal* **10**, 77.
- 214 National Institute of Standards and Technology 2002 Mass spectral library. *Gaithersburg, USA: National Institute of Standards and Technology*
- 215 Bačić, T., Lawrence, T. & Cutler, D. 1992 Leaf anatomy of an Arbutus taxon from Yugoslavia. *Kew bulletin* , 535–543.
- 216 Rotondi, A., Rossi, F., Asumis, C. & Cesaraccio, C. 2003 Leaf xeromorphic adaptations of some plants of a coastal Mediterranean macchia ecosystem. *Journal of Mediterranean Ecology* **4**, 25–36.
- 217 Yadav, R. K. P., Bosabalidis, A. M. & Vokou, D. 2004 Leaf structural features of Mediterranean perennial species: plasticity and life form specificity. *J Biol Res* **2**, 21–34.
- 218 Llusia, J. & Peñuelas, J. 2000 Seasonal patterns of terpene content and emission from seven Mediterranean woody species in field conditions. *American Journal of Botany* **87**, 133–140.
- 219 Güven, A. & Kendir, G. 2012 The leaf anatomy of some Erica taxa native to Turkey. *Turkish Journal of Botany* **36**, 253–262.
- 220 Gratani, L. & Varone, L. 2004 Leaf key traits of *Erica arborea* L., *Erica multiflora* L. and *Rosmarinus officinalis* L. co-occurring in the Mediterranean maquis. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants* **199**, 58–69.
- 221 Laederich, O. & Lecoffre, Y. 2006 Construire une cheminée: Conception, réalisation et restauration...(Coll. Guide technique, ).
- 222 Vittone, R. 2010 *Bâtir: manuel de la construction*. PPUR.
- 223 Doat, J., Valette, J. C., Askri, D., Calimartin, L., Bettachini, M. & Moro, M. 1981 Le pouvoir calorifique supérieur d'espèces forestières méditerranéennes. *Annales des Sciences forestières*. **38**, 469–486.
- 224 Doat, J. & Valette, J. 1980 L'inflammabilité de quelques bois tropicaux. *Revue Bois et Forêts des Tropiques* , 43.
- 225 Saidur, R., Abdelaziz, E. A., Demirbas, A., Hossain, M. S. & Mekhilef, S. 2011 A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **15**, 2262–2289.
- 226 Gillon, D., Hernando, C., Valette, J. C. & Joffre, R. 1997 Fast estimation of the calorific values of forest fuels by near infrared-reflectance spectroscopy. *Canadian Journal of Forest Research* **27**, 760–765.

- 227 Benyoussef, E. H., Yahiaoui, N., Khelfaoui, A. & Aid, F. 2005 Water distillation kinetic study of spearmint essential oil and of its major components. *Flavour and fragrance journal* **20**, 30–33.
- 228 Babu, G. D. K. & Singh, B. 2009 Simulation of Eucalyptus cinerea oil distillation: A study on optimization of 1, 8-cineole production. *Biochemical Engineering Journal* **44**, 226–231.
- 229 Benyoussef, E. H., Beddek, N., Belabbes, R. & Bessiere, J. M. 2000 Evolution des effets de certains paramètres opératoires de l'entraînement à la vapeur d'eau des graines de coriandre sur le rendement en huile essentielle. *Entropie* **36**, 18–23.
- 230 Milojević, S. \vZ, Stojanović, T. D., Palić, R., Lazić, M. L. & Veljković, V. B. 2008 Kinetics of distillation of essential oil from comminuted ripe juniper ( Juniperus communis L.) berries. *Biochemical Engineering Journal* **39**, 547–553.
- 231 IEA - Home. <http://iea.org/>
- 232 Junginger, H. M., van Dam, J. M. C., Zarrilli, S., Mohamed, F. A., Marchal, D. & Faaij, A. P. C. 2010 Opportunities and barriers for sustainable international bioenergy trade. *IEA Bioenergy*
- 233 Ladanai, S. & Vinterbäck, J. 2009 Global potential of sustainable biomass for energy. SLU, Institutionen för energi och teknik *Report 013 ISSN 1654-9406*
- 234 Marchal, D., Van Stappen, F. & Schenkel, Y. 2008 Critères et indicateurs de production «durable» des biocombustibles solides: état des lieux et recommandations. *Gembloux, Centre Wallon de Recherches Agronomiques*
- 235 Babcock & Company, W. 2005 *Steam Its Generation and Use*. Kessinger Publishing.
- 236 Demirbas, A. 2005 Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in energy and combustion science* **31**, 171–192.
- 237 Demirbas, A. 2004 Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in energy and combustion science* **30**, 219–230.
- 238 Rousseaux, P. 1998 Analyse du Cycle de Vie: Évaluation des impacts. *Techniques de l'ingénieur. Environnement* **3**.
- 239 Milojević, S. \vZ, Stojanović, T. D., Palić, R., Lazić, M. L. & Veljković, V. B. 2008 Kinetics of distillation of essential oil from comminuted ripe juniper (Juniperus communis L.) berries. *Biochemical Engineering Journal* **39**, 547–553.
- 240 Hancı, S. S., Sahin, S. & Yılmaz, L. 2003 Isolation of volatile oil from thyme (Thymbra spicata) by steam distillation. *Food/Nahrung* **47**, 252–255.
- 241 Farhat, A., Ginies, C., Romdhane, M. & Chemat, F. 2009 Eco-friendly and cleaner process for isolation of essential oil using microwave energy: Experimental and theoretical study. *Journal of Chromatography A* **1216**, 5077–5085.

- 242 Gamiz-Gracia, L. & Luque de Castro, M. D. 2000 Continuous subcritical water extraction of medicinal plant essential oil: comparison with conventional techniques. *Talanta* **51**, 1179–1185.
- 243 Leybros, J. & Fremeaux, P. 1990 Extraction solide-liquide. I. Aspects théoriques. *Techniques de l'ingénieur. Génie des procédés* **2**, J2780–1.
- 244 Moulin, J. P., Pareau, D., Rakib, M. & Stambouli, M. 1988 *Cinétique du transfert de matière entre deux phases*. Ed. Techniques Ingénieur.
- 245 Barret, P. & Bracconi, P. 2002 Heterogeneous kinetics: from solid–gas reaction to solid–liquid dissolution. *Thermochimica acta* **388**, 91–103.
- 246 Cassel, E. & Vargas, R. M. F. 2006 Experiments and modeling of the Cymbopogon winterianus essential oil extraction by steam distillation. *Journal of the Mexican Chemical Society* **50**, 126–129.
- 247 Koul, V. K., Gandotra, B. M., Koul, S., Ghosh, S., Tikoo, C. L. & Gupta, A. K. 2004 Steam distillation of lemon grass (Cymbopogon spp.). *Indian J Chem Technol* **11**, 135–39.
- 248 Spiro, M. & Kandiah, M. 1989 Extraction of ginger rhizome: kinetic studies with acetone. *International Journal of Food Science & Technology* **24**, 589–600.
- 249 Cassel, E., Vargas, R. M. F., Martinez, N., Lorenzo, D. & Dellacassa, E. 2009 Steam distillation modeling for essential oil extraction process. *Industrial crops and Products* **29**, 171–176.
- 250 Spiro, M., Kandiah, M. & Price, W. 1990 Extraction of ginger rhizome: kinetic studies with dichloromethane, ethanol, 2-propanol and an acetone—water mixture. *International Journal of Food Science & Technology* **25**, 157–167.
- 251 Sovová, H. & Aleksovski, S. A. 2006 Mathematical model for hydrodistillation of essential oils. *Flavour and fragrance journal* **21**, 881–889.
- 252 Benyoussef, E. H., Hasni, S., Belabbes, R. & Bessiere, J. M. 2002 Modélisation du transfert de matière lors de l'extraction de l'huile essentielle des fruits de coriandre. *Chemical Engineering Journal* **85**, 1–5.
- 253 Cerpa, M. G., Mato, R. B. & José Cocero, M. 2008 Modeling steam distillation of essential oils: Application to lavandin super oil. *AIChE Journal* **54**, 909–917.
- 254 Babu, G. D. K. & Singh, B. 2009 Simulation of Eucalyptus cinerea oil distillation: A study on optimization of 1,8-cineole production. *Biochemical Engineering Journal* **44**, 226–231.
- 255 Bontemps, A. 1995 Échangeur de chaleur, Description des échangeurs. *Techniques de l'ingénieur, B* **2**, 341.
- 256 DA-Conceicao, C. & Youbi-idrissi, M. 2008 Simulation d'un condenseur à air brumisé: étude paramétrique. *CEMAGREF*

- 257 Feidt, R. *Refrigerants Atmospheriques*. Ed. Techniques Ingénieur.
- 258 Serth, R. W. 2007 *Process heat transfer: principles and applications*. Academic Press.
- 259 Boumahammed, A. 2013 Conception, modélisation et optimisation d'un aérocondenseur pour l'extraction des huiles essentielles. *mémoire de magistère*, ENP
- 260 Stambouli, A. B. & Koinuma, H. 2012 A primary study on a long-term vision and strategy for the realisation and the development of the Sahara Solar Breeder project in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **16**, 591-598.
- 261 Boudghene Stambouli, A. 2011 Algerian renewable energy assessment: The challenge of sustainability. *Energy Policy* **39**, 4507-4519.
- 262 Brevet d'invention: Unité d'extraction d'huiles essentielles mobile, fonctionnant aux énergies renouvelables et ne générant pas de rejets "Mobilab". N° 090352 Date de dépôt 13/6/2009