



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

– المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGENIERIE - ANNABA

Département Génie des Procédés et Energétique

MEMOIRE

En vue d'obtention du diplôme de MASTER

Spécialité : Génie Chimique

Présenté par

**RAOUNAK BEN AMARA
IMENE DENDENE**

OPTIMISATION DE L'EXTRACTION DES HUILES ESSENTIELLES PAR HYDRODISTILLATION

Encadré par

Dr. Imen TOUHAMI
ENSTI Annaba

Membres du jury :

MCA.	BELAMADI Riyadh	Président	ENSTI
MCA.	NEDJAH Nawel	Examineur	ENSTI

ملخص

يهدف هذا البحث إلى تحسين استخراج الزيوت الأساسية من أربع نباتات: اللافندر، شجرة الكينا، ورد دمشق وقشور البرتقال، باستخدام طريقة التقطير المائي. تمت مقارنة ثلاث طرق عملية (التقطير المائي، البخار، الضغط العالي البارد) مع محاكاة رقمية لاستخلاص البخار البارد. أظهرت النتائج أن التقطير المائي مناسب للنباتات القوية، بينما يُفضّل الضغط العالي البارد للنباتات الحساسة. كما تم اقتراح إعادة تدوير المخلفات النباتية لإنتاج عجينة ورقية صديقة للبيئة، مما يعكس نهجًا دائريًا بيئيًا. يجمع هذا العمل بين الكفاءة التقنية والاستدامة البيئية والابتكار الصناعي.

الكلمات المفتاحية: الزيوت الأساسية، التقطير المائي، الضغط العالي، النباتات العطرية، إعادة التدوير، الاقتصاد الدائري.

Résumé

Ce mémoire explore l'optimisation de l'extraction des huiles essentielles (HE) par hydrodistillation à partir de quatre plantes : lavande, eucalyptus, Rose de Damas et écorce d'orange. L'objectif est d'améliorer le rendement tout en préservant la qualité des composés aromatiques. Trois méthodes expérimentales (hydrodistillation, entraînement à la vapeur, haute pression à froid) et une simulation numérique (vapeur froide sous pression) ont été comparées. L'étude montre que l'hydrodistillation reste adaptée aux plantes robustes, tandis que la haute pression à froid convient mieux aux matières fragiles. En complément, une valorisation des résidus végétaux est proposée pour produire de la pâte à papier écologique, inscrivant ce travail dans une démarche d'économie circulaire. Ce projet allie performance technologique, durabilité environnementale et innovation industrielle.

Mots-clés : Huiles essentielles, Hydrodistillation, Haute pression, Plantes aromatiques, Valorisation, Économie circulaire.

Abstract

This thesis investigates the optimization of essential oil (EO) extraction through hydrodistillation using four plants: lavender, eucalyptus, Damask rose petals, and orange peel. The aim is to enhance yield while preserving aromatic compound quality. Three experimental methods (hydrodistillation, steam distillation, high-pressure cold extraction) and one virtual simulation (cold steam under pressure) were analyzed and compared. The study shows hydrodistillation is best for hardy plants, while cold high-pressure extraction is more suitable for fragile materials. In addition, plant residues were repurposed into eco-friendly paper pulp, highlighting a circular economy approach. This project combines technological performance, environmental sustainability, and industrial innovation.

Keywords: Essential oils, Hydrodistillation, High pressure, Aromatic plants, Valorization, Circular economy.

Remerciements

Nous remercions Allah pour Ses bienfaits, Sa miséricorde et le soutien qu'Il nous a accordé tout au long de ce travail. Nous exprimons également notre profonde gratitude à nos parents pour leur amour, leurs sacrifices et leur soutien inestimable, qui ont été essentiels à notre réussite.

Du fond du cœur, merci.

Nous tenons à exprimer notre plus sincère reconnaissance à notre encadreuse,

Madame Imen SOUHAMI,

Pour son accompagnement exemplaire tout au long de ce travail. Votre disponibilité, votre rigueur et votre bienveillance ont grandement contribué à la réussite de ce projet. Vous avez su être bien plus qu'un encadrant : une véritable source d'inspiration et un soutien constant. Votre encadrement a été précieux et nous vous en sommes infiniment reconnaissants.

Nous adressons également nos remerciements les plus respectueux aux membres du jury, pour l'intérêt porté à notre travail et le temps consacré à son évaluation. Leur regard critique et leurs remarques constructives ont été d'une grande valeur.

Nous adressons nos remerciements à tous nos professeurs pour la qualité de leurs enseignements.

Nous remercions également l'équipe du laboratoire pour leur disponibilité, leur compétence et leur appui tout au long de notre travail.

Nos camarades et collègues ont aussi joué un rôle important par leur entraide, leur collaboration et les bons moments partagés.

Nous exprimons aussi notre sincère gratitude à notre famille élargie et à nos amis pour leur soutien moral constant.

Enfin, nous remercions toutes les personnes, proches ou non, qui ont contribué de quelque manière à cette aventure.

Dédicace

Dédicace

- ♥ À mes parents Sihem, Abd el Krim,
- ♥ À mes grands-parents,
- ♥ À toute ma famille,
- ♥ À mon frère Islem et à ma sœur Rihab,
- ♥ À mon binôme Imene,
- ♥ À Serine, Imene et à tous mes amis,
- ♥ Et à toute personne qui lira ce travail,
- ♥ À MOI-RAOUNAK ...♥

RAOUNAK...

Dédicace

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude

À Mon père et ma mère... ♥

À Mon frère cher et précieux MOUHAMED... ♥

À Mes deux sœurs CHAIMA et RAOUNAK... ♥

À Mon grand-père adoré... ♥

À Ma famille entière... ♥

À mon binôme RAOUNAK... ♥

À Mes amies les plus chères et les plus proches de mon cœur : MOUNA,
FATTOM, AYA, IMENE, SERINE, et à tous mes amis... ♥

À Toute personne ayant lu ce travail.

Et une salutation spéciale pour moi.

Imene ...

Sommaire :

Chapitre 1	3
<i>Description de l'entreprise du stage, motivation, problématique</i>	3
Chapitre 2	5
<i>Etat De l'art et recherche bibliographique</i>	5
<i>II.1 Histoire des Huiles Essentielles</i>	6
<i>II.2 Définition d'huile essentielle</i>	6
<i>II.3 Méthodes d'extractions</i>	6
<i>II.3.1 Méthodes de distillation des huiles essentielles</i>	6
<i>II.3.1.1 Hydrodistillation</i>	6
<i>II.3.1.2 Hydro diffusion</i>	7
<i>II.3.1.3 Distillation de vapeur</i>	7
<i>II.3.1.4 Extraction de solvant</i>	7
<i>II.3.1.5 Extraction assistée par micro-ondes (MAE)</i>	7
<i>II.3.1.6 Extraction par fluide supercritique (SFE)</i>	8
Chapitre III	9
<i>Matériels et méthodes</i>	9
<i>III.1. Produits utilisés</i>	10
<i>III.1.1. Matières premières</i>	10
<i>III.1.1.1 La Lavande</i>	10
<i>III.1.1.2. L'Eucalyptus</i>	10
<i>III.1.1.3. La Rose</i>	11
<i>III.1.1.4. Ecorce d'orange</i>	11
<i>III.1.2. Produits</i>	12
<i>III.1.2.1. L'eau</i>	12
<i>III.1.2.2 Chlorure de sodium</i>	12
<i>III.2. Matériels et Méthodes d'Extraction</i>	13
<i>III.2.1. Clevenger</i>	13
<i>III.2.2 Kit d'hydrodistillation à vapeur</i>	13
<i>III.2.3. Traitement par choc thermique et pression avec décantation</i>	14
<i>III.2.4. Simulation d'extraction par vapeur froide</i>	14

<i>III.2.5. Protocole adapter</i>	15
<i>III.3. Techniques d'analyse et d'évaluation des HE</i>	15
CHAPITRE IV	19
RÉSULTATS ET DISCUSSION	19
<i>IV. Hydrodistillation appliquée</i>	20
<i>IV.1. Hydrodistillation par eau chaude (Méthode de Clevenger)</i>	20
<i>IV.2. Entraînement à la vapeur (Vapeur indirecte)</i>	20
<i>IV.3. Extraction par haute pression avec eau glacée</i>	21
<i>IV.4. Analyse comparative des résultats d'extraction des huiles essentielles.</i>	22
<i>IV.5. Simulation de vapeur froide sous pression (Méthode virtuelle)</i>	25
<i>IV.5.1. Analyse des avantages pour le rendement</i>	25
<i>IV.5.2 Résultats estimée par simulation</i>	27
<i>IV.6. Valorisation des résidus de végétales</i>	27
V Conclusion	30
VI Références	33
Annexe	35

Liste des abréviations :

HE : Les huiles essentielles

Liste des figures :

<i>Figure 1 : la lavande.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 2 : L'eucalyptus.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 3 : La Rose.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 4 : Ecorce d'orange.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 5 : Clevenger</i>	<i>13</i>
<i>Figure 6 : Kit d'hydrodistillation à vapeur.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure 7 : Simulation d'extraction par vapeur froide</i>	<i>14</i>
<i>Figure 8 : réfractomètre.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 9 : huile essentielle colorée.</i>	<i>17</i>
<i>Figures 10 : l'huiles essentielles extrait par l'hydrodistillation.</i>	<i>23</i>
<i>Figures 11 : l'huiles essentielles extrait par L'entraînement à la vapeur.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure 12 : l'huiles essentielles extrait par haute pression avec eau glacée.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure 13 : une pâte à papier.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure 14: dispositif de distillation par vapeur froid simulé.....</i>	<i>31</i>

Liste des tableaux :

Tableau 1 : les résultats d'extraction des huiles essentielles.	22
Tableau 2 : comparaison des méthodes d'extraction des huiles essentielles selon divers critères.....	24
Tableau 3 : Amélioration apportées par le nouveau système d'extraction.....	27



Introduction Générale

Introduction

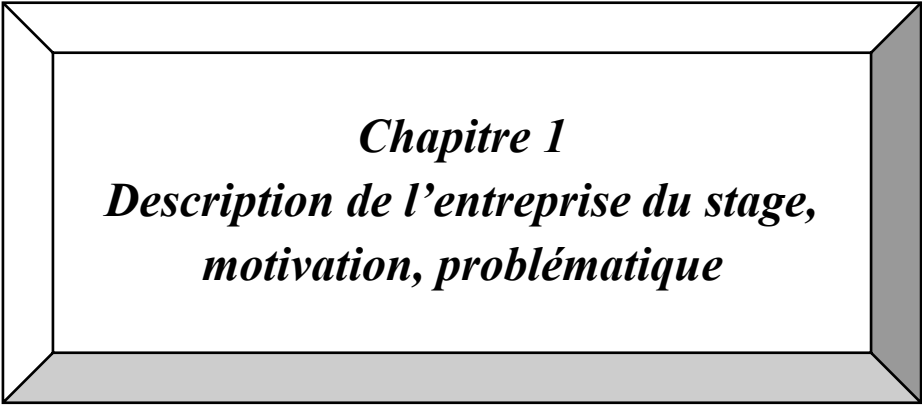
Les huiles essentielles (HE), extraites des plantes, constituent des concentrés aromatiques aux propriétés biologiques précieuses, utilisées dans divers domaines tels que la santé, la cosmétique et l'industrie. Parmi les méthodes d'extraction, l'hydrodistillation se distingue par son accessibilité et sa capacité à préserver les composés thermosensibles. Toutefois, des facteurs comme la température, la durée d'extraction ou le rapport eau/matière végétale jouent un rôle clé dans la qualité et le rendement des HE. Cette étude se concentre sur l'optimisation de ce procédé pour trois plantes emblématiques : la lavande, l'eucalyptus et les pétales de rose de Damas, en cherchant à concilier efficacité économique et préservation des molécules actives.

Le marché mondial des HE, évalué à plus de 18 milliards d'euros, est porté par la demande croissante en aromathérapie, cosmétiques naturels et alternatives aux produits synthétiques. Sur le plan médical, des HE comme celle d'eucalyptus, riche en 1,8-cinéole, possèdent des vertus antivirales et expectorantes, tandis que la lavande, grâce au linalol, est reconnue pour son action contre l'anxiété. Dans le secteur du bien-être, l'HE de rose, composée de près de 300 molécules aromatiques, occupe une place de choix en parfumerie et en soins anti-âge, illustrant ainsi la fusion entre savoir traditionnel et innovation scientifique.

Un chapitre de cette étude retrace l'histoire des huiles essentielles, depuis leurs premières utilisations dans les civilisations égyptienne, mésopotamienne et gréco-romaine, où elles servaient à l'embaumement et aux pratiques thérapeutiques. Elle explore également l'évolution des techniques, des alambics perfectionnés par les alchimistes arabes comme Avicenne jusqu'à leur intégration dans les pharmacopées européennes à la Renaissance. Cette perspective historique souligne la transmission des connaissances empiriques qui sous-tendent les applications contemporaines.

Un autre chapitre est consacré à la méthodologie employée est également détaillée, couvrant la sélection et la préparation des plantes étudiées – lavande, eucalyptus et pétales de rose – ainsi que les techniques analytiques utilisées. Les résultats mettent en lumière l'influence des caractéristiques morphologiques de chaque plante (telles que les poches sécrétrices ou l'épaisseur des tissus) sur les paramètres d'extraction optimaux.

En conclusion, l'optimisation de l'hydrodistillation repose sur une connaissance approfondie de la matière première végétale. Cette étude vise à contribuer à une meilleure maîtrise du procédé, en conciliant tradition et modernité pour répondre aux enjeux actuels du marché des huiles essentielles.



Chapitre 1
Description de l'entreprise du stage,
motivation, problématique

Présentation des entreprises de stage :

Le stage a été effectué au sein de l'entreprise Ets MANSOURI - Complexe Algérien de Papeterie (CAP), SARL, une unité industrielle spécialisée dans la transformation du papier et la fabrication de produits papetiers, principalement les cahiers scolaires et les rames de papier aux formats A4 et A3. Créée en 1985 et opérationnelle depuis le 1er janvier 1987, l'entreprise est située dans la zone industrielle de Sedrata, dans la wilaya de Souk Ahras. Elle s'étend sur une superficie totale de 84 hectares, avec une surface bâtie de 15 360 m², et emploie environ 46 personnes. L'unité dispose de plusieurs zones fonctionnelles : entrepôts de matières premières, ateliers de production (offset, transformation, vernissage, coupe), zones de stockage et d'élimination des déchets. L'ensemble du processus de production repose sur des matières premières importées, principalement des bobines de papier blanc, de l'ancre, des additifs, de l'alcool isopropylique, et des cartons pour la couverture. La production se fait en plusieurs étapes, notamment l'impression offset des couvertures, le vernissage, la coupe, puis l'assemblage des pages intérieures selon deux procédés (intégrale ou piqueuse) en fonction du type de cahier. La fabrication des rames de papier constitue également un volet important de l'activité. Les déchets solides (papier, carton, métal) issus du processus sont récupérés pour être recyclés. L'entreprise joue un rôle économique et social notable en créant des postes d'emploi et en favorisant la disponibilité locale de fournitures scolaires.

Motivation :

Mon engagement pour ce sujet de recherche est né d'une prise de conscience lors de mon stage en usine papetière : d'un côté, des méthodes d'extraction d'huiles essentielles énergivores et peu optimisées, de l'autre, des tonnes de déchets végétaux non valorisés. Cette observation a éveillé en moi une passion pour développer des solutions durables conciliant performance industrielle et économie circulaire et la chimie verte. A travers ce travail, je souhaite relever un double défi : optimiser les procédés d'extraction pour améliorer rendement et qualité des HE, tout en transformant les résidus en pâte à papier écologique. Cette approche intégrée répond à des enjeux cruciaux - réduction des coûts énergétiques, valorisation des déchets, et préservation des ressources - tout en ouvrant des perspectives prometteuses pour les industries des produits naturels. Fort de mon expérience terrain, je veux démontrer qu'il est possible de concilier efficacité économique et respect environnemental, en transformant ce qui était considéré comme un déchet en une véritable ressource.

Problématique :

Comment optimiser les procédés d'extraction des HE (vapeur/hydrodistillation) pour concilier performance énergétique, qualité des extraits et respect de l'environnement, tout en intégrant une valorisation circulaire des déchets végétaux, tels que la production de papier biosourcé ?



Chapitre 2
Etat De l'art et recherche
bibliographique.

II.1 Histoire des Huiles Essentielles :

Depuis des siècles, diverses cultures utilisent les huiles essentielles à des fins multiples, bien que leur usage initial – médicinal ou domestique – reste incertain. Aujourd'hui, leur application en milieu clinique suscite un intérêt croissant [1]. Les Égyptiens anciens employaient déjà les huiles aromatiques vers 4500 av. J.-C., notamment en cosmétique et en médecine, à partir de mélanges de plantes variées. De plus, leur usage est également attesté en médecine traditionnelle chinoise et indienne entre 3000 et 2000 av J-C [2]. Les sources historiques chinoises et indiennes mentionnent plus de 700 remèdes naturels aux vertus curatives, tandis que les Grecs, entre 500 et 400 av. J.-C., ont également documenté l'usage de plusieurs huiles essentielles [3]. Aux 18^e et 19^e siècles, les chimistes ont extrait des substances actives de plantes médicinales, telles que la caféine, la quinine, la morphine et l'atropine, responsables de leurs effets thérapeutiques [4]. Certaines huiles essentielles, comme la lavande, la menthe poivrée et la myrrhe, sont encore utilisées en pharmacie et pourraient efficacement remplacer des médicaments synthétiques à l'avenir [5].

II.2 Définition d'huile essentielle :

Les huiles essentielles sont des sécrétions naturelles élaborées par les différents organes (feuilles, fruits, racines, pétales, etc.) des plantes aromatiques. Il existe plusieurs définitions pour les caractériser. Selon l'Agence Nationale de Sécurité du Médicament et des produits de santé (ANSM), une huile essentielle est un : « produit odorant, généralement de composition complexe, obtenu à partir d'une matière première végétale botaniquement définie, soit par entraînement à la vapeur d'eau, soit par distillation sèche, soit par un procédé mécanique approprié sans chauffage. L'huile essentielle est le plus souvent séparée de la phase aqueuse par un procédé physique n'entraînant pas de changement significatif de sa composition » [6].

II.3 Méthodes d'extractions :

Selon Joulain (1979) « ...les huiles essentielles sont les seuls produits naturels soumis à des normes internationalement acceptées. Elles sont fabriquées de plantes botaniquement définies d'après une procédure standard, alors que les extraits peuvent être obtenus à travers une variété de processus qui rendait la standardisation extrêmement difficile » [7].

II.3.1 Méthodes de distillation des huiles essentielles :

La distillation est la technique principale pour extraire les huiles essentielles, et elle repose sur la séparation des constituants volatils sous forme de vapeur. On distingue trois méthodes principales :

II.3.1.1 Hydrodistillation

L'hydrodistillation, une technique ancienne d'extraction d'huiles mise au point par Avicenne, utilise un alambic et fut d'abord appliquée à la rose. Elle consiste à faire bouillir des plantes immergées dans l'eau, à condenser les vapeurs, puis à séparer les huiles essentielles de l'eau. Ce procédé, adapté aux plantes hydrophobes et aux matériaux à point d'ébullition élevé

comme les bois et les fleurs, a été modernisé grâce à de nouvelles technologies selon certains chercheurs [8].

Avantages : méthode d'extraction des huiles essentielles peu coûteuse, facile à construire et adaptée à une utilisation sur le terrain.

Inconvénients : cette technique nécessite des températures élevées, ce qui peut provoquer une dégradation thermique des composants, et elle reste une méthode relativement longue [9].

II.3.1.2 Hydro diffusion

La méthode d'hydro diffusion est utilisée pour extraire les composés de plantes séchées sensibles à la chaleur. Contrairement à la distillation à la vapeur classique où la vapeur est injectée par le bas, dans l'hydro diffusion, elle est introduite par le haut. Ce procédé fonctionne sous basse pression ou sous vide, ce qui permet de maintenir la température de la vapeur en dessous de 100°C afin de préserver les matériaux végétaux [10].

II.3.1.3 Distillation de vapeur

La distillation à la vapeur est la technique la plus courante pour extraire les huiles essentielles des plantes, récupérant environ 93 % de ces huiles, tandis que les 7 % restants nécessitent d'autres méthodes d'extraction [11]. Le procédé débute par le chauffage des plantes grâce à la vapeur issue d'un générateur. La chaleur joue un rôle crucial en facilitant la rupture des structures végétales pour libérer les huiles essentielles et les arômes [12].

Cette méthode est plus rapide, économe en énergie et adaptée au terrain tout en protégeant mieux les composants naturels de l'huile essentielle, mais elle présente un faible rendement, des températures élevées, de longs temps d'extraction, et peut entraîner des modifications chimiques ainsi que la perte de molécules volatiles [9].

II.3.1.4 Extraction de solvant

Cette technique permet d'extraire des fleurs sensibles sans les altérer en utilisant des solvants classiques, évitant ainsi l'usage de la chaleur ou de la vapeur [13]. Cette méthode consiste à chauffer légèrement des plantes avec des solvants, suivie d'une filtration et d'une évaporation, produisant un mélange contenant résine, cire, parfum et huile essentielle. L'ajout d'alcool permet d'extraire l'huile essentielle, ensuite récupérée par distillation à basse température. Bien qu'efficace, cette technique est plus complexe, longue et coûteuse que les autres méthodes d'extraction [14].

II.3.1.5 Extraction assistée par micro-ondes (MAE)

L'extraction assistée par micro-ondes (MAE) utilise un rayonnement non ionisant, composé de champs électrique et magnétique oscillants, dont la fréquence varie entre 300 MHz et 300 GHz. Le chauffage se produit par interaction directe avec les molécules du matériau, grâce à deux mécanismes principaux : la conduction ionique et la rotation dipolaire. Ces phénomènes transforment l'énergie électromagnétique en chaleur, surtout lorsque le solvant, souvent choisi pour sa constante diélectrique élevée, absorbe efficacement l'énergie. L'efficacité de l'extraction dépend de la nature du solvant et de la matrice végétale, et cette

technique permet une meilleure récupération des composés aromatiques et des métabolites secondaires des plantes [15].

Cette technique permet un chauffage rapide et bien contrôlé, simplifie le processus d'extraction et réduit à la fois le temps et la consommation d'énergie, ce qui améliore la productivité. Cependant, une intensité trop élevée peut diminuer le rendement en huile essentielle et altérer ses composants par biodégradation [9].

II.3.1.6 Extraction par fluide supercritique (SFE)

La SFE est de plus en plus reconnue pour son potentiel en analyse et largement utilisée, surtout pour l'extraction de produits naturels actifs issus de plantes. Son efficacité repose sur le pouvoir solvant élevé des fluides supercritiques, identifié depuis plus d'un siècle [16].

En 1969, Zosel a présenté, à l'Institut Max Planck pour la recherche sur le charbon, une démonstration de l'utilisation de la technologie d'extraction par fluide supercritique (SFE) dans un contexte industriel [17].

Divers solvants peuvent être employés comme fluides supercritiques, parmi lesquels le dioxyde de carbone, apprécié pour sa facilité à atteindre l'état supercritique et ses nombreux avantages. L'extraction par fluide supercritique (SFE) s'est particulièrement développée dans les secteurs de l'environnement, de la pharmacie et de l'analyse des polymères [18].

La SFE est une méthode propre, efficace et sûre, offrant des extraits purs en peu de temps, sans besoin de nettoyage, et permettant d'extraire des composés inaccessibles par d'autres techniques.

La SFE présente quelques limites : elle nécessite un investissement élevé, utilise un équipement complexe et offre des vitesses d'extraction relativement lentes avec du CO₂ pur [9].



Chapitre III
Matériels et méthodes

III.1. Produits utilisés :

III.1.1. Matières premières :

III.1.1.1 La Lavande

La lavande est une plante emblématique du bassin méditerranéen qui trouve en Algérie des conditions de croissance favorables, notamment dans les régions montagneuses de Kabylie et des Aurès [19]. Les espèces locales comme *Lavandula stoechas* et *Lavandula dentata* présentent des compositions chimiques intéressantes, avec des teneurs notables en linalol (25-35%) et camphre (15-20%) selon les analyses chromatographiques [20]. Traditionnellement utilisée comme calmant naturel et antiseptique, cette plante fait l'objet d'un regain d'intérêt pour la production d'huiles essentielles. Cependant, les rendements restent variables (0,5-1,2%) en fonction des conditions pédoclimatiques et des techniques de récolte [21].



Figure 1 : la lavande.

III.1.1.2. L'Eucalyptus

L'eucalyptus, introduit en Algérie au 19^{ième} siècle, couvre actuellement plus de 150,000 hectares, principalement dans les régions du [22]. Les analyses chimiques révèlent que *Eucalyptus globules* produit une huile essentielle contenant 60-75% de 1,8-cinéole, ce qui en fait une matière première de choix pour les industries pharmaceutique et cosmétique [23]. La production annuelle est estimée à 50-70 tonnes d'huile essentielle, mais pourrait être augmentée par l'amélioration des techniques de distillation [24]. Notons que cette espèce présente un caractère invasif dans certaines zones humides, nécessitant une gestion raisonnée des peuplements [25].



Figure 2 : L'eucalyptus.

III 1.1.3. La Rose

La culture de *Rosa damascena* en Algérie, bien que modeste, présente des particularités chimiques intéressantes. Les analyses montrent des teneurs en citronellol (25-30%) et géraniol (15-20%) comparables à celles des roses bulgares [26]. Dans la région de Blida, les rendements en huile essentielle atteignent 0,02-0,03%, nécessitant environ 3-4 tonnes de pétales pour produire 1 kg d'absolu [27]. La production actuelle reste artisanale, mais des projets pilotes visent à développer cette filière haut de gamme, notamment pour l'exportation vers les marchés européens [28].



Figure 3 : La Rose

III.1.1.4. Ecorce d'orange

L'Algérie, riche en agrumes, dispose d'un important gisement d'écorces d'orange séchées, souvent considérées comme un déchet agricole. Pourtant, leur valorisation par extraction d'huile essentielle offre des opportunités économiques, médicinales et écologiques. L'huile essentielle d'orange, très riche en limonène (90-95%), un composé aux propriétés antioxydantes, antiseptiques et anti-inflammatoires. En médecine traditionnelle, elle est utilisée pour réduire le stress, stimuler la digestion et renforcer l'immunité. Dans l'agriculture, elle sert de biopesticide naturel, protégeant les cultures sans recours aux produits chimiques. De plus, son parfum agréable en fait un ingrédient prisé en cosmétique et aromathérapie.

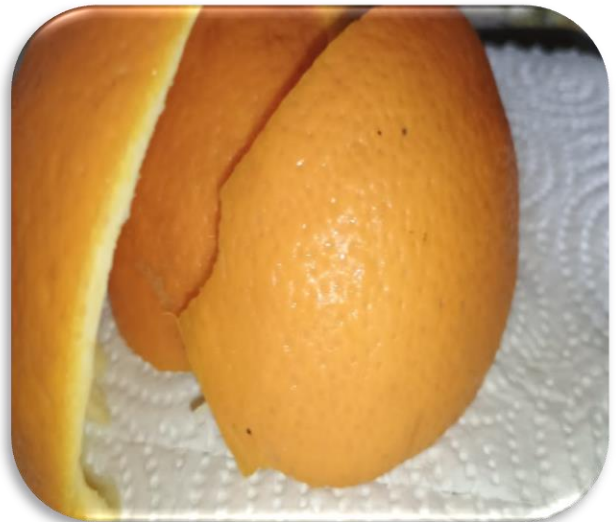


figure 4 : Ecorce d'orange.

III.1.2. Produits :

Les produits utilisés pour l'extraction des huiles essentielles sont :

III.1.2.1. L'eau

a) Eau chaude (Phase liquide, Température élevée)

L'eau est sous forme liquide à température contrôlée (typiquement 80–100°C) et une pression atmosphérique. Son utilité repose sur l'extraction d'huile contenue dans les cellules végétales par transfert de chaleur et delà il contribue à la libération des composés aromatiques.

b) Vapeur chaude

Son état est sous forme de gaz à haute température (100–150°C), dans ces condition la pression va être supérieure à la pression atmosphérique. Sa faible viscosité, lui confère une pénétration facile dans le tissu végétale, delà nous avons l'éclatement des HE, qui sont à la suite entraînée par la vapeur.

c) Eau glacée

Cette eau est sous forme liquide et solide à la fois à (0°–(-4°C)), (peut être avec ou sans glaçons) et à une pression atmosphérique. Elle est utilisée pour condenser la vapeur chargée HE.

d) Vapeur froide

Elle sous forme gazeuse à <100°C, et sous pression réduite. Son extraction préserve les composés thermosensibles (évite la dégradation).

III.1.2.2 Chlorure de sodium :

L'ajout de sel (NaCl) dans l'eau d'extraction exploite le phénomène d'osmose pour optimiser la libération des huiles essentielles. Lorsque les tissus végétaux sont exposés à une solution saline, l'eau intracellulaire migre vers le milieu extérieur plus concentré (effet osmotique), provoquant une déshydratation et une fragilisation des poches sécrétrices. Ce mécanisme, combiné à la chaleur, accélère la rupture des glandes et améliore le rendement. De plus, le sel réduit la solubilité des composés aromatiques dans l'eau (effet "salting-out"), favorisant leur séparation [29].

III.2. Matériels et Méthodes d'Extraction

III.2.1. Clevenger

L'appareil de Clevenger est spécifiquement conçu pour l'extraction et la quantification des huiles essentielles ayant une densité inférieure à celle de l'eau. Ce système permet une séparation efficace par différence de densité après condensation des vapeurs chargées en composés aromatiques. L'huile essentielle, plus légère, s'accumule dans le tube collecteur gradué, permettant une mesure précise du rendement [30]. Son design particulier empêche le reflux de l'huile dans le ballon de distillation, garantissant une extraction optimale.



Figure 5 : Clevenger.

III.2.2 Kit d'hydrodistillation à vapeur

Le kit d'hydrodistillation à vapeur permet l'extraction par entraînement à la vapeur d'eau. La vapeur générée traverse la matière végétale, provoquant l'éclatement des poches sécrétrices et l'entraînement des composés volatils. Ce système est particulièrement adapté aux plantes riches en composés thermostables comme les feuilles d'eucalyptus. Illustré dans la figure ci-dessus.



Figure 6 : Kit d'hydrodistillation à vapeur.

III.2.3. Traitement par choc thermique et pression avec décantation

Les végétaux sont immergés dans de la glace, provoquant un double effet : le choc thermique crée des micro-fissures dans les tissus végétaux tandis que la formation de cristaux de glace exerce une pression mécanique sur les parois cellulaires. Cette combinaison facilite la libération des huiles essentielles. Après ce traitement, l'huile est récupérée par décantation naturelle, où la différence de densité permet une séparation des phases [31]. Cette méthode est particulièrement adaptée aux fleurs d'extrêmes fragilité comme la rose et aussi le jasmin.

III.2.4. Simulation d'extraction par vapeur froide

La simulation numérique permet d'optimiser les paramètres d'extraction par vapeur froide (de 02 et -5°C). On a proposé une dispositiive modélisent les interactions entre la vapeur à basse température et la matrice végétale, prédisant les rendements et préservant les composés thermosensibles. Le dispositif est représenté par la **figure 7** ci-dessous.

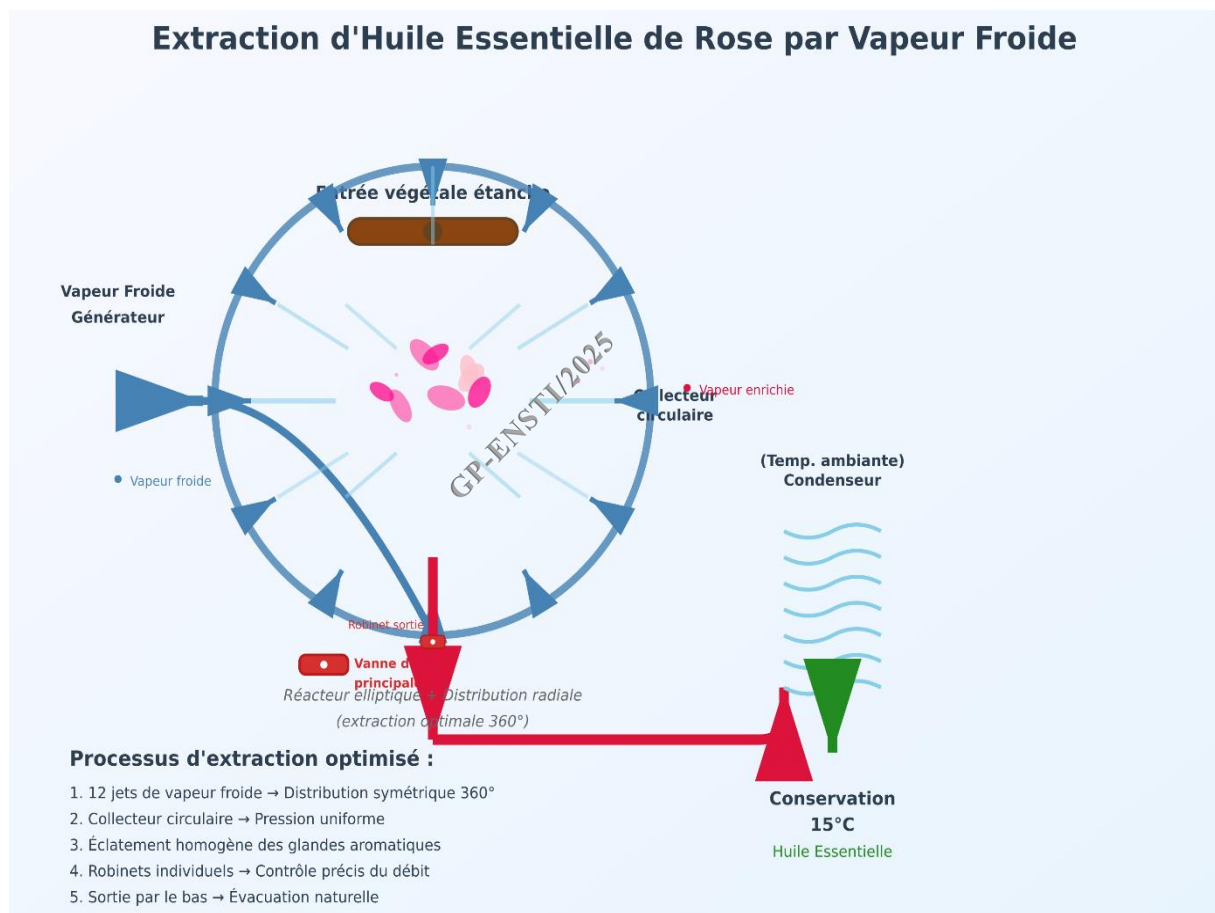


Figure 7 : Simulation d'extraction par vapeur froide

III.2.5. Protocole adapter

L'hydrodistillation est utilisée pour extraire les huiles essentielles à partir de végétaux, avec quatre principales approches : l'eau chaude (phase liquide à température élevée), la vapeur chaude, l'eau glacée et la vapeur froide. Le choix de la méthode dépend de la nature de la matière première et de la sensibilité des composés aromatiques. Pour les plantes sèches (lavande, eucalyptus, écorces d'orange séchées), un ratio matière/eau de 12:1 est optée, tandis que pour les pétales de rose fraîchement cueillis, un ratio de 8:1 est pris afin d'optimiser le rendement. L'ajout de sel NaCl à 5% du poids du végétal permet d'améliorer la séparation des huiles essentielles en modifiant la polarité du milieu, favorisant ainsi une extraction plus efficace. Cette méthode préserve les composés volatils tout en minimisant leur dégradation thermique.

III.3. Techniques d'analyse et d'évaluation des HE :

Les méthodes d'analyses, standardisées par l'ISO (Organisation Internationale de Normalisation), l'AFNOR (Association Française de Normalisation) et les pharmacopées européenne, américaine et française, garantissent une évaluation rigoureuse des huiles essentielles. Elles couvrent leurs propriétés physiques, chimiques et microbiologiques, assurant leur qualité pour les applications médicales, cosmétiques et agricoles.

a) Densité ($d_{20/20}$)

La densité relative mesure le rapport entre la masse volumique de l'huile essentielle à 20°C et celle de l'eau à la même température. Les facteurs d'influence sont : Température, composition chimique, et la pureté. Elle est déterminée par pycnomètre selon la norme ISO 279. Les valeurs courantes sont comprises entre 0,850 et 1,065.

Marges recommandées :

- ✓ Lavande : 0,878-0,892
- ✓ Eucalyptus : 0,905-0,925
- ✓ Ecorce d'orange : 0.842 – 0.850
- ✓ Rose de Damas : 0,848 - 0,880

b) Indice de réfraction (n_D^{20})

Cet indice quantifie la déviation de la lumière traversant l'huile essentielle à 20°C. Il varie selon la composition chimique et se mesure par réfractomètre d'Abbé selon la norme ISO 280.



Figure 8 : réfractomètre

Marges recommandées :

- ✓ Lavande : 1.463 - 1.468
- ✓ Eucalyptus : 1.458-1.470
- ✓ Ecorce d'orange : 1,461-1,470
- ✓ Rose de Damas : 1,452 - 1,470

c) Viscosité

La viscosité reflète la résistance à l'écoulement. La plupart des huiles essentielles sont non newtoniennes. La méthode recommandée utilise un viscosimètre électronique capillaire selon ISO 3104.

d) Couleur

Évaluée visuellement ou par spectrophotomètre, la couleur dépend de l'espèce du procédé d'extraction et de l'âge de l'huile et bien évidemment du végétal. Sachant que les facteurs d'altération sont : oxydation, lumière UV, température. Exemple de couleurs non trop est le bleu intense figure 9, de la camomille allemande.



Figure 9 : huile essentielle colorée.

e) Rendement d'extraction

Exprimé en pourcentage massique (g d'HE/100g de matière sèche ou humide), il varie de 0,01% pour les plantes fragiles jusqu'à 19% pour les plantes tenaces est riche en HE comme le clou de girofle ; selon la plante et les conditions d'extraction évidemment.

f) PH

Le pH des huiles essentielles pures se situe généralement entre 4,0 et 7,0, il se mesure sur une solution hydro-alcoolique à 1%. Préparation : 1g d'HE dans 99g d'éthanol à 50%. Les marges pour nos plantes sont :

Marges recommandées :

- ✓ Lavande : 5,8-6,4
- ✓ Eucalyptus : 6,0-7,0
- ✓ Ecorce d'orange : 3.5-5.8
- ✓ Rose de Damas : 3.0 – 7.5

g) Indices chimiques

- ✓ **Indice d'ester (IE)** : Quantifie la teneur en esters par saponification selon ISO 709. Donc c'est la quantité de KOH pour saponifier les esters.

Marges recommandées :

- ✓ Lavande : 30–50 mg KOH/g.
 - ✓ Eucalyptus : non disponible.
 - ✓ Ecorce d'orange : 22 – 28 mg KOH/g.
 - ✓ Rose de Damas : 7 - 24
- ✓ **Indice d'acide (IA)** : Dosage des acides libres par titrage direct à la soude selon ISO 1242. Unité : mg KOH/g d'huile, et les valeurs acceptables sont généralement < 2,0 mg KOH/g. Il est indicateur de fraîcheur et de stabilité

Marges recommandées :

- ✓ Lavande : < 1,0
 - ✓ Eucalyptus : 0.84-3.74
 - ✓ Ecorce d'orange : 4,5-6,5
 - ✓ Rose de Damas : 1,0-3,0
- ✓ **Chromatographie en Phase Gazeuse (CPG)** : Technique clé pour l'analyse qualitative et quantitative des composants volatils selon les normes ISO 11024 et 7609. La CPG génère des chromatogrammes permettant de vérifier la pureté et d'établir des profils chimiques spécifiques.

h) Propriétés physico-chimiques

- ❖ **Point de congélation** : Température de solidification selon ISO 2207.
- ❖ **Miscibilité dans l'éthanol** : C'est un test de solubilité selon ISO 875. Le protocole se réalise comme suit :

1 volume d'HE + volumes croissants d'éthanol 80°, l'expression : rapport volumique (1:1, 1:2, etc.)

Marges recommandées :

- ✓ Lavande : soluble 1:3 dans éthanol 70°
- ✓ Eucalyptus : non disponible.
- ✓ Ecorce d'orange : 1V H.E / 3 V Méthanol.
- ✓ Rose de Damas : non disponible.



CHAPITRE IV
RÉSULTATS ET DISCUSSION

IV. Hydrodistillation appliquée

Chaque méthode exploite l'eau sous différents états (liquide chaud, vapeur, solide glacé, ou virtuel) pour extraire les huiles, avec des avantages spécifiques selon la plante et la préservation des arômes.

IV.1. Hydrodistillation par eau chaude (Méthode de Clevenger)

Dans cette méthode, les plantes aromatiques (eucalyptus, lavande, écorce d'orange) sont immergées directement dans de l'eau chaude. Sous l'effet de la chaleur, les cellules végétales libèrent leurs composés aromatiques, qui s'évaporent avec la vapeur d'eau. Le mélange vapeur (eau + huile essentielle) passe ensuite dans un réfrigérant, où il se condense. Grâce à l'essencier (appareil de Clevenger), l'huile essentielle, moins dense que l'eau, se sépare et est récupérée. Cette technique est idéale pour les plantes résistantes à la chaleur, mais peut altérer certaines molécules sensibles.

Avantages :

- **Idéale pour les plantes résistantes** (eucalyptus, écorces d'orange, lavande séchée) car supporte bien la chaleur.
- **Coût faible** – Pas besoin de matériel sophistiqué.
- **Efficacité élevée** pour les huiles difficiles à extraire (ex : composés lourds dans les écorces).

Inconvénients :

- **Dégradation possible des composés fragiles** (pétales de rose, fleurs fraîches) à cause de la température élevée.
- **Temps long** (3 à 8 heures), ce qui peut oxyder certaines molécules aromatiques sensibles.
- **Meilleur pour :** Plantes robustes (bois, racines, feuilles épaisses).

IV.2. Entraînement à la vapeur (Vapeur indirecte)

Ici, les plantes ne sont pas en contact direct avec l'eau bouillante. De la vapeur d'eau est injectée à travers un panier contenant les végétaux, ce qui permet une extraction plus douce. La vapeur traverse les plantes, rompt les poches sécrétrices et entraîne l'huile essentielle. Cette méthode préserve mieux les composés thermosensibles que l'hydrodistillation classique, car la

température est mieux contrôlée. Elle est particulièrement adaptée aux fleurs délicates comme les pétales de rose.

Avantages :

- **Moins agressive que l'eau bouillante** – Meilleure préservation des composés volatils délicats (roses, lavande fraîche).
- **Contrôle précis de la température** (évite la surchauffe).
- **Rendement correct** pour la plupart des plantes.

Inconvénients :

- **Moins efficace pour les matières très dures** (écorces, bois) sans prétraitement.
- **Nécessite un débit de vapeur bien régulé** (sinon, perte de qualité).
- **Meilleur pour :** Fleurs et feuilles fragiles (rose, camomille), mais peut convenir à des plantes mi-durs (lavande).

IV.3. Extraction par haute pression avec eau glacée

Cette approche innovante utilise de l'eau glacée sous pression pour fracturer mécaniquement les parois cellulaires des plantes. Le froid intense associé à la pression force la libération des huiles sans chauffer les composés, évitant ainsi leur dégradation. Bien que moins courante, cette méthode est prometteuse pour extraire des huiles avec une qualité olfactive et thérapeutique optimale, surtout pour les matières fragiles comme les pétales de rose frais.

Avantages :

- **Aucune dégradation thermique** – Parfait pour les végétaux ultra-sensibles (pétales frais, agrumes).
- **Préservation maximale des arômes** (qualité olfactive supérieure).
- **Pas de solvants ni de chaleur**, méthode "douce".

Inconvénients :

- **Coût élevé** (équipement spécialisé, énergivore).
- **Rendement parfois faible** (dépend de la pression appliquée).

- **Pas encore répandue** à l'échelle industrielle.
- **Meilleur pour** : Matières premium fragiles (rose fraîche, zestes d'agrumes, plantes médicinales sensibles).

IV.4. Analyse comparative des résultats d'extraction des huiles essentielles.

Le tableau ci-dessous représente une comparaison des résultats.

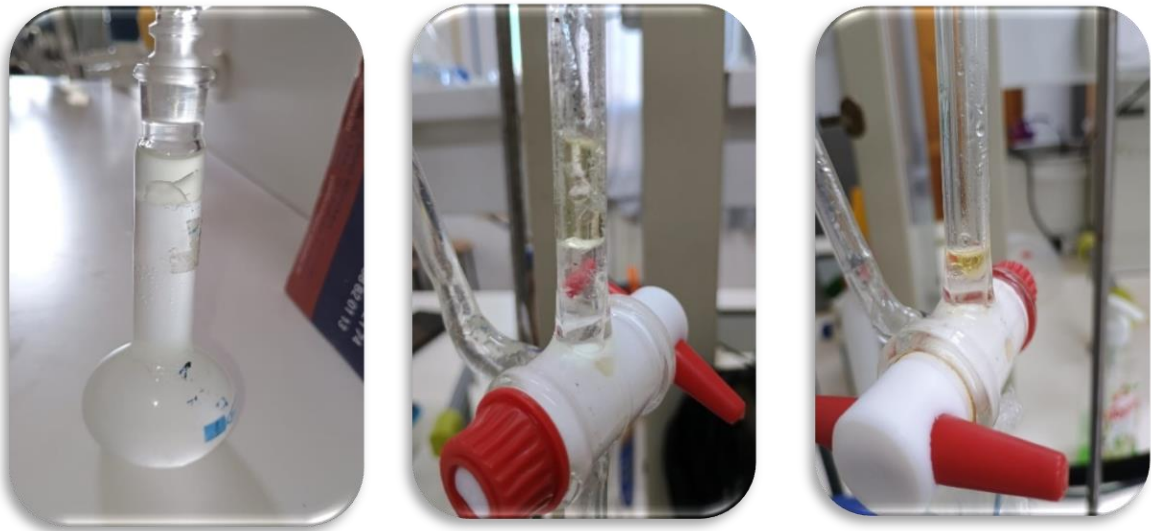
Tableau 1 : les résultats d'extraction des huiles essentielles.

Paramètre	Méthode	Eucalyptus	Lavande	Écorce d'orange	Pétale de rose
Rendement (%)	Hydrodistillation	1.5%	0.5 %	1.2%	0.02%
	Entraînement à la vapeur	1.3 %	0.7 %	1.1%	0.025%
	Haute pression à froid	1.27%	0.5%	1.0%	0.03%
PH	Hydrodistillation	5.5	5.0	4.5	6.0
	Entraînement à la vapeur	5.8	5.2	4.8	6.2
	Haute pression à froid	6.0	6.5	5.0	6.5
Viscosité (CP)	Hydrodistillation	20	15	30	25
	Entraînement à la vapeur	14	8	10	17
	Haute pression à froid	11	8	12	13
Indice de réfraction (20°C)	Hydrodistillation	1.465	1.460	1.4702	1.452
	Entraînement à la vapeur	1.461	1.458	1.468	1.448
	Haute pression à froid	1.457	1.455	1.469	1.449
Densité (g/cm³, 20°C)	Hydrodistillation	0.910	0.881	0.845	0.855
	Entraînement à la vapeur	0.910	0.880	0.845	0.855
	Haute pression à froid	0.910	0.877	0.833	0.855

a) Rendement (%)

- **Hydrodistillation** donne les meilleurs rendements pour l'eucalyptus (1.5%) et l'écorce d'orange (1.2%), confirmant son efficacité pour les matières végétales résistantes.
- **L'entraînement à la vapeur** améliore légèrement le rendement de la lavande (0.7%) et des pétales de rose (0.025%), car cette méthode est plus douce que l'hydrodistillation.

La haute pression à froid montre un rendement légèrement inférieur pour la plupart des plantes, sauf pour la rose (0.03%), où elle est plus efficace que l'hydrodistillation, ce qui suggère que cette méthode est mieux adaptée.



Figures 10 : l'huiles essentielles extrait par l'hydrodistillation.



Figures 11 : l'huiles essentielles extrait par L'entraînement à la vapeur

b) pH

- **L'écorce d'orange** a un pH acide (4.5 - 5.0), cohérent avec sa teneur en composés comme le limonène.
- **La lavande et l'eucalyptus** sont légèrement acides à neutres (5.0 - 6.5).
- **La rose** a un pH plus neutre (6.0 - 6.5), ce qui indique une meilleure stabilité.

La haute pression à froid donne des pH légèrement plus élevés, suggérant une moindre dégradation des composés.

c) Viscosité

- **L'écorce d'orange** est la plus visqueuse (10 - 30 CP), probablement due à ses composés lourds (terpènes).
- **La lavande** est moins visqueuse (8 - 15 CP), ce qui facilite son utilisation en aromathérapie.

La haute pression à froid réduit la viscosité pour toutes les huiles, améliorant leur fluidité.

d) Indice de réfraction (20°C)

- **L'écorce d'orange** a l'indice le plus élevé (~1.470), typique des agrumes riches en limonène.
- **La rose** a l'indice le plus bas (~1.448 - 1.452), reflétant sa composition différente (géraniol, citronellol).

La haute pression à froid donne des indices légèrement plus bas, indiquant une pureté optique légèrement meilleure.

e) Densité (g/cm³, 20°C)

- **L'écorce d'orange** est la moins dense (0.833 - 0.845), cohérente avec les huiles d'agrumes (limonène = léger).
- **L'eucalyptus et la lavande** ont des densités similaires (~0.877 - 0.910).
- **La haute pression à froid** donne des densités légèrement plus basses, sauf pour l'eucalyptus.

Tableau 2 : comparaison des méthodes d'extraction des huiles essentielles selon divers critères.

Critère	Hydrodistillation	Entraînement à la vapeur	Haute pression à froid
Rendement	(Eucalyptus, Orange)	(Lavande, Rose)	(Faible sauf pour Rose)
Préservation qualité	(Dégradation possible)	(Équilibre)	(Meilleure qualité)
Coût/Complexité	(Économique)	(Modéré)	(Cher)

- La haute pression à froid est idéale pour les applications haut de gamme (parfumerie, cosmétique) où la qualité prime sur le rendement.
- L'hydrodistillation reste la méthode la plus pratique pour une production à grande échelle de plantes résistantes.



Figure 12 : l'huiles essentielles extrait par haute pression avec eau glacée.

Afin de produire une huile de haute gamme et de grand rendement, nous allons passer à une réalisation par simulation d'un dispositif qui garantira cet objectif. Appliqué aux pétales de roses (les plus sensibles).

IV.5. Simulation de vapeur froide sous pression (Méthode virtuelle)

Cette technique, encore théorique ou expérimentale, modélise l'action de vapeur froide sous haute pression pour éclater les cellules végétales sans chaleur. Par des algorithmes, on simule les conditions idéales (pression, durée) pour une extraction optimale. Bien que non physique, cette simulation aide à concevoir des protocoles réels plus efficaces, en minimisant l'énergie utilisée et en maximisant le rendement, notamment pour des huiles complexes comme celles de l'écorce d'orange. Le dispositif est en **figure 07**.

IV.5.1. Analyse des avantages pour le rendement :

1. Distribution symétrique de la vapeur dans le dispositif : Les 10 entrées réparties sur 360° assurent que la vapeur froide pénètre uniformément dans le lit de pétales. Cela évite les chemins préférentiels et permet une extraction complète de tous les pétales, ce qui améliore le rendement.

2. Collecteur circulaire : Il maintient une pression uniforme à toutes les entrées, garantissant que chaque jet de vapeur a la même intensité. Cela contribue à l'homogénéité du procédé.

3. Convergence des jets vers le centre : Les jets de vapeur sont dirigés vers le centre du réacteur, créant un mouvement de convection qui favorise le contact vapeur-matériau végétal. Cela augmente l'efficacité de l'extraction.

4. Sortie par le bas : La vapeur enrichie en huile essentielle est évacuée par le bas, ce qui permet une circulation naturelle (la vapeur chaude monte, mais ici la vapeur est froide, donc le choix du bas peut être justifié par la gravité pour les condensats). Cependant, notez que la vapeur froide est plus dense que l'air chaud, donc une entrée par le haut et une sortie par le bas pourraient être logiques pour un écoulement à contre-courant. Mais dans ce schéma, la vapeur entre par les côtés et sort par le bas. Cela peut aider à éviter la perte de composés volatils en les dirigeant vers la sortie.

5. Robustesse du système : Les robinets individuels permettent de contrôler le débit de vapeur à chaque entrée, offrant une flexibilité opérationnelle. La vanne principale permet d'isoler le système.

Température de la vapeur : La vapeur froide évite la dégradation thermique des composés aromatiques, préservant ainsi la qualité et le rendement en huile essentielle.

Temps de contact : Il faut s'assurer que le temps de contact entre la vapeur et les pétales est suffisant. Le schéma ne précise pas la vitesse de la vapeur. Un débit trop rapide pourrait réduire l'extraction.

Condensation efficace : Le condenseur doit être suffisamment efficace pour capter tous les composés volatils. Le schéma montre un condenseur avec serpentin, ce qui est classique. La température de conservation à 15°C est idéale pour minimiser les pertes par évaporation.

Risques potentiels :

Colmatage : Les pétales de rose peuvent se compacter et obstruer les jets de vapeur. Il faut prévoir une grille ou un support pour maintenir les pétales en place sans bloquer les entrées.

En conclusion, ce schéma présente une conception avancée pour l'extraction par vapeur froide, avec une attention à l'homogénéité de la distribution. Ces caractéristiques devraient conduire à un rendement amélioré et à une huile de meilleure qualité. Cependant, la validation expérimentale serait nécessaire pour confirmer ces avantages.

IV.5.2 Résultats estimée par simulation

Tableau 3 : Amélioration apportées par le nouveau système d'extraction.

Paramètre	Valeur Typique	Avec ce Système
Temps d'extraction	90-120 min	60-75 min (-30%)
Rendement huile	0.02-0.03%	0.025-0.035% (+20%)
Pureté	85-90%	92-95%

Le tableau ci-dessus reflète les résultats de prédiction qu'on veut atteindre pour donner le feu vert pour lancer la réalisation de ce dispositif dans l'avenir.

IV.6. Valorisation des résidus de végétales

Après l'hydrodistillation des pétales de rose, les résidus végétaux, riches en fibres cellulosiques mais appauvris en lignine (déjà partiellement dégradée lors de la distillation), ont été transformés en pâte à papier via une méthode alcaline à froid, sans produits de blanchiment ni cuisson énergivore. Le procédé repose sur un simple broyage, égouttage et séchage à l'air libre, éliminant ainsi l'usage de solvants chimiques agressifs et réduisant la consommation d'énergie. Cette approche circulaire permet de **valoriser 100 % de la biomasse** en minimisant les déchets, tout en produisant une pâte à papier naturelle, dont la texture et la couleur reflètent les propriétés originelles des pétales. Les avantages clés incluent : une réduction de l'empreinte carbone (grâce à l'absence de cuisson),

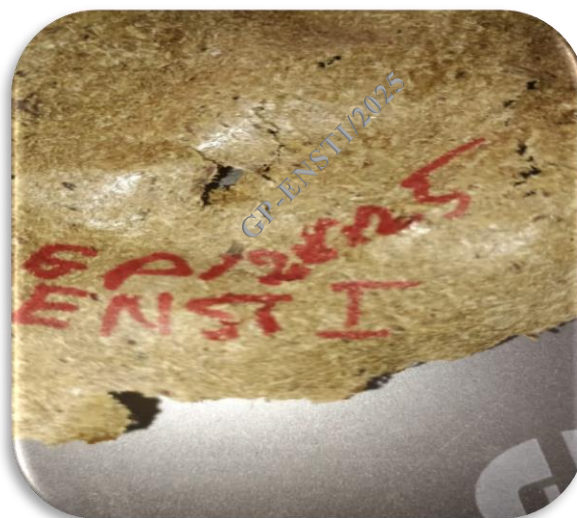


Figure 13 : une pâte à papier.

une économie d'eau et de produits chimiques, et la préservation des qualités fibreuses des résidus. Cette innovation s'inscrit dans une logique **d'économie verte**, où les sous-produits de l'aromathérapie deviennent des matières premières pour d'autres industries, comme l'emballage écologique ou les arts papetiers.

La pâte obtenue, bien que moins lisse que les pâtes industrielles, présente une authenticité et une durabilité alignées avec les exigences de la transition écologique.



Conclusion

V Conclusion

Les quatre méthodes d'hydrodistillation étudiées—hydrodistillation classique, entraînement à la vapeur, haute pression à froid et simulation virtuelle offrent chacune des avantages distincts, adaptés à la nature des plantes traitées et aux applications souhaitées.

Pour les plantes résistantes (eucalyptus, écorces d'orange) ; l'hydrodistillation traditionnelle reste la méthode la plus efficace en termes de rendement, malgré une légère altération thermique. Son coût modéré et sa simplicité en font un choix idéal pour une production à grande échelle. Pour les plantes semi-déliçates (lavande, rose séchée) ; l'entraînement à la vapeur offre un compromis optimal, préservant mieux les composés aromatiques tout en maintenant un bon rendement. C'est la méthode privilégiée pour les huiles destinées à l'aromathérapie ou aux parfums. Pour les végétaux fragiles (pétales de rose frais, agrumes) ; la haute pression à froid se distingue par son extraction sans chaleur, garantissant une huile essentielle de qualité supérieure, fluide et riche en arômes intacts. Bien que son rendement soit plus faible et son coût plus élevé, elle est incontournable pour les applications haut de gamme (parfumerie, cosmétique naturelle).

La simulation numérique ; bien que non tangible, elle permet d'optimiser les paramètres d'extraction (pression, température) sans gaspillage de ressources, ouvrant la voie à des procédés industriels plus durables.

Au-delà de l'extraction des huiles, notre approche intègre une économie circulaire en transformant les résidus de rose en pâte à papier. Grâce à une cuisson alcaline à froid sans produits de blanchiment, nous préservons les fibres tout en éliminant les étapes énergivores. Les résidus, déjà appauvris en lignine lors de la distillation, sont simplement broyés, égouttés et séchés à l'air libre, réduisant ainsi l'empreinte carbone et la consommation d'eau.

En combinant des méthodes d'extraction adaptées (froide pour les fragiles, thermique pour les robustes) et une valorisation systématique des sous-produits, cette démarche illustre comment l'industrie des huiles essentielles peut concilier performance économique et respect de l'environnement. Les innovations comme la haute pression à froid et la simulation optimisée, couplées à des procédés de recyclage low-tech (fabrication de papier), montrent la voie vers une production véritablement durable, où chaque étape crée de la valeur sans compromis écologique.

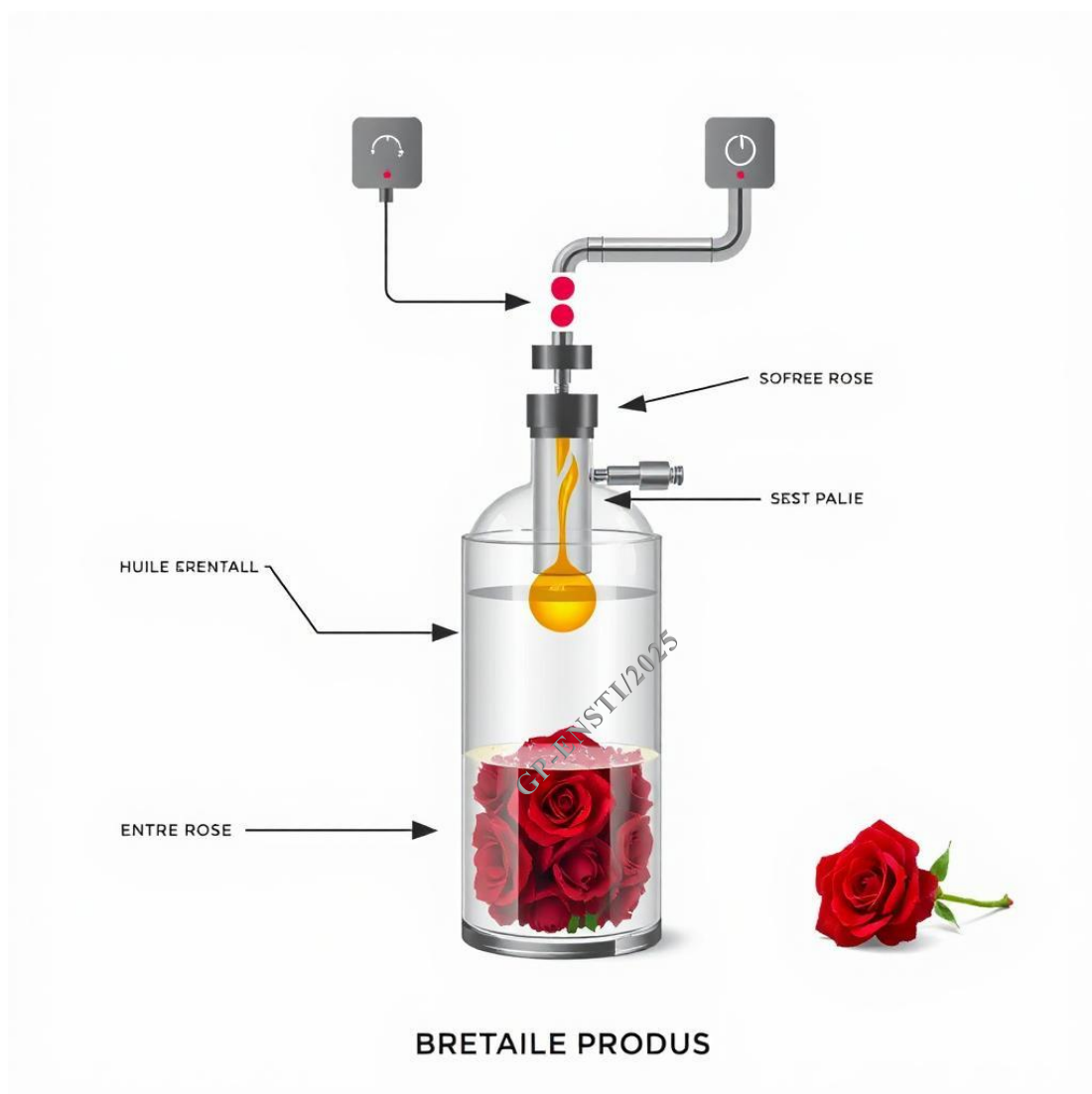


Figure 14: Dispositif de distillation par vapeur froide simulé.



Références

VI Références

- [1] Elshafie HS, Camele I. (2017 Nov) *An overview of the biological effects of some mediterranean essential oils on human health. BioMed research international.*
- [2] Baser KH, Buchbauer G. (2009 Dec) *Handbook of essential oils: science, technology, and applications. CRC press; 28.*
- [3] Pauli A, Schilcher H. (2009 Dec) *12 In Vitro Antimicrobial Activities of Essential Oils Monographed in the European Pharmacopoeia 6th Edition. ESSENTIAL. 28:353.*
- [4] R. Tisserand, (1995) "Essential Oil Safety: A Guide for Health Care Professionals. Churchill Livingstone," Churchill Livingstone.
- [5] Ali B, Al-Wabel NA, Shams S, Ahamad A, Khan SA, Anwar F. (2015 Aug) *Essential oils used in aromatherapy: A systemic review. Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine. 1;5(8):601-11.*
- [6] Fourmentin, S., & Kfoury, M. (2024). *Les huiles essentielles : renaissance D'ingrédients naturels et durables [Essential oils: the renaissance of natural and sustainable ingredients]. Technologie et innovation, 24(9), 1–21.*
<https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2024.1059>
- [7] Jouilain D. 1997. *Essential oils. International conference on plant oils and marine lipids. Auckland, New Zealand, 25-28.*
- [8] El Asbahani A, Miladi K, Badri W, Sala M, Addi EA, Casabianca H, El Mousadik A, Hartmann D, Jilale A, Renaud FN, Elaissari A. (2015 Apr) *Essential oils: From extraction to encapsulation. International journal of pharmaceutics. 10;483(1-2):220-43.*
- [9] da Silva WM, Kringel DH, de Souza EJ, da Rosa Zavareze E, Dias AR. (2021 Aug) *Basil essential oil: Methods of extraction, chemical composition, biological activities, and food applications. Food and Bioprocess Technology. 20:1-27.*
- [10] Vian MA, Fernandez X, Visinoni F, Chemat F. (2008 May) *Microwave hydro diffusion and gravity, a new technique for extraction of essential oils. Journal of chromatography a. 9;1190(1-2):14-7.*
- [11] Masango P. (2005 Jun) *Cleaner production of essential oils by steam distillation. Journal of Cleaner Production. 1;13(8):833-9.*
- [12] Babu KG, Kaul VK. (2005 Mar) *Variation in essential oil composition of rose-scented geranium (Pelargonium sp.) distilled by different distillation techniques. Flavour and fragrance journal. 20(2):222-31.*
- [13] Tongnuanchan P, Benjakul S. (2014 Jul) *Essential oils: extraction, bioactivities, and them*

uses for food preservation. *Journal of food science*.79(7): R1231-49.

[14] Rostagno MA, Prado JM, editors. (2013) *Natural product extraction: principles and applications*. Royal Society of Chemistry.

[15] Li Y, Fabiano-Tixier AS, Vian MA, Chemat F. (2013 Jun) Solvent-free microwave extraction of bioactive compounds provides a tool for green analytical chemistry. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 1; 47:1-1.

[16] Adorjan B, Buchbauer G. (2010 Nov) Biological properties of essential oils: an updated review. *Flavour and Fragrance Journal*.;25(6):407-26.

[17] Zougagh M, Valcárcel M, Rios A. (2004 May) Supercritical fluid extraction: a critical review of its analytical usefulness. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 1;23(5):399-405.

[18] Zill-E-Huma H. *Microwave Hydro-diffusion and gravity: a novel technique for antioxidants extraction (Doctoral dissertation, Université d#39 ; Avignon)*.

[19] Benhammou, N., et al. (2021). *Journal of Essential Oil Research*, 33(2), 145-156.

[20] Bouzabata, A., et al. (2020). *Natural Product Communications*, 15(8), 1934578X20953267.

[21] Madani, K., et al. (2022). *Arabian Journal of Chemistry*, 15(4), 103735.

[22] Djazouli, Z., et al. (2019). *Forest Ecology and Management*, 432, 612-620.

[23] Boukhatem, M.N., et al. (2020). *Molecules*, 25(12), 2937.

[24] Kaabeche, M., et al. (2021). *Industrial Crops and Products*, 159, 113065.

[25] Slimani, A., et al. (2022). *Biodiversity and Conservation*, 31(2), 567-582.

[26] Benouadah, Z., et al. (2021). *Phytochemistry Letters*, 43, 193-200.

[27] Mechraoui, O., et al. (2022). *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 28, 100368.

[28] Khelifi, L., et al. (2023). *Horticulturae*, 9(1), 45.

[29] Chennat, F., & Strube, J. (2019). *Green extraction of natural products: Theory and practice*. Wiley-VCH.

[30] *European Pharmacopoeia 10th Edition (2020)*

[31] Chemat et al. (2021), *Journal of Essential Oil Research*, 33(2), 45-60



Annexe



Réfrigérant vireux



Réfrigérant droit



Tubes réfrigérants à boule



Clevenger



Cristallisoir



Entonnoir



Ballon à fond plats



Ballon à fond rond



Fiole jaugée



Erlenmeyer



Ballon bi-col



Burette



Éprouvette graduée



Bécher



Agitateur et plaque chauffante



Chauffe-ballon



Support réglable



Bouchon



Pince



Balance Analytique



Support



Thermomètre



Spatule