

Influence De L'utilisation D'un Nouveau Systèmes D'extraction Sur Le Rendement En Huile Essentielle À Madagascar : Cas Des Huiles Essentielles De Ravintsara, Niaouli Et Gingembre

Toky Andriatsilavina Ranjohany¹, Joely Nirina Rakotovao Ravahatra², Nicole Ramanambe³, Pierre Rakotomamonjy⁴

¹Ingénieur Polytechnicien

École Doctorale « Génie des Procédés et des Systèmes Industriels, Agricoles et Alimentaires », École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, Madagascar
ndreka.ranjohany@gmail.com

²Docteur en génie des procédés et des systèmes industriels agricoles et alimentaires
Enseignant-Chercheur, Maître de Conférences
Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques
Université d'Antananarivo, Madagascar
rjoelynirina@yahoo.fr

³Professeur Titulaire à l'École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo
Université d'Antananarivo, Madagascar

⁴Professeur à l'École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo
Université d'Antananarivo, Madagascar

Auteur correspondant : Joely Nirina Rakotovao Ravahatra ; rjoelynirina@yahoo.fr



Résumé - L'objectif général de ce travail de recherche consiste à déterminer un système d'extraction des huiles essentielles de ravintsara, gingembre et niaouli, permettant d'augmenter le rendement obtenu et maintenir la qualité y afférente, en vue de contribuer à la promotion de la science et la technologie, au développement durable de Madagascar et à l'atteinte des objectifs de développement durable à l'horizon 2030. Les résultats montrent que l'amélioration du système de refroidissement et le transfert progressif du flux de vapeur condensée à travers les trois tubes circulaires longitudinaux constituent des innovations technologiques, permettant d'augmenter les rendements en huile essentielle. En effet, les études expérimentales à l'échelle semi-industrielle révèlent que des teneurs maximales en huile essentielle de 2,40% pour l'extraction de ravintsara, de 3,02% pour celle de niaouli, et de 2,13% pour l'huile essentielle de gingembre, sont obtenues.

Mots-clés : Huile essentielle, extraction, rendement, plantes endémiques, développement.

Abstract - The overall objective of this research is to determine an extraction system for ravintsara, ginger, and niaouli essential oils that increases yield while maintaining quality, thereby contributing to the promotion of science and technology, the sustainable development of Madagascar, and the achievement of the Sustainable Development Goals by 2030. The results show that improvements to the cooling system and the gradual transfer of condensed vapor through three longitudinal circular tubes constitute technological

innovations that increase essential oil yields. Indeed, semi-industrial-scale experimental studies reveal maximum essential oil concentrations of 2.40% for *ravintsara*, 3.02% for *niaouli*, and 2.13% for ginger.

Keywords: Essential oil, extraction, yield, endemic plants, development.

1. Introduction

Madagascar forme un pays qualifié de mégabiodiversité, avec des capitaux extrêmement élevés en matière de richesse en ressources naturelles et en espèces biologiques. En effet, 5% de la biodiversité mondiale appartiennent à la grande île, et le taux d'endémisme dépasse significativement les 80% aussi bien pour la faune que pour la flore. Ces espèces florales constituent des éléments pourvoyant des intérêts scientifiques, socio-économiques et sanitaires inestimables [1]. Madagascar possède 11220 espèces de plantes d'Angiospermes, dont 84% sont endémiques [2].

Les plantes de *ravintsara* [3], gingembre [4] et *niaouli* [5] rassemblent une grande partie de ces richesses végétales à Madagascar. Ces végétaux prennent une place fondamentale non seulement pour l'émergence socio-économique [6] et environnementale de la population locale, mais également pour leur santé. Par ailleurs, les huiles essentielles, extraits aromatiques de ces plantes à partir de différents procédés technologiques, regorgent de substances apportant des effets thérapeutiques très importants pour la santé humaine en particulier, tels que, entre autres, les propriétés anti-infectieuses, anti-inflammatoires, anti-oxydantes et anesthésiantes.

Cependant, malgré les vertus thérapeutiques et les différents usages disponibles extraits à partir de ces huiles essentielles, la problématique de la recherche réside dans le fait que la production d'huile essentielle reste archaïque et artisanale. Cette situation diminue la productivité et n'arrive pas à répondre aux demandes en croissance. De ces faits, face aux enjeux considérables induits par la production de ces huiles essentielles, au niveau des collectivités locales et à l'échelle nationale, la présente étude a entrepris des recherches scientifiques et technologiques à Madagascar, dans le cadre de thèse de doctorat, d'un système amélioré et plus performant d'extraction de huiles essentielles. L'objectif général de ce travail de recherche consiste à déterminer un système d'extraction des huiles essentielles de *ravintsara*, gingembre et *niaouli*, permettant d'augmenter le rendement obtenu et maintenir la qualité y afférente, en vue de contribuer à la promotion de la science et la technologie, au développement durable de Madagascar et à l'atteinte des objectifs de développement durable à l'horizon 2030.

2. Matériels et méthodes

2.1. Cadre de l'étude

La présente étude se déroule à Madagascar, situé dans l'Océan Indien à l'Est du canal de Mozambique, s'étendant sur une superficie de 587.000 km² et possède plus de 5.000 kilomètres de côtes. Dans le cadre de cette étude, il existe plusieurs lieux de collecte des matières premières. À propos du gingembre, les rhizomes de *Zingiber officinale* Roscoe, appelés communément gingembre, ont été récoltés dans la région Est de Madagascar, plus précisément dans la commune de Beforona et ses environs, située dans la région d'Alaotra Mangoro. Les feuilles de *niaouli* sont récoltées dans la partie Est de l'île, au niveau de la Région Atsinanana et ses environs. Pour les feuilles de *ravintsara*, plusieurs sites ont fait l'objet de récolte. Ils concernent la Province d'Antananarivo et ses environs.

Le présent travail de recherche se base sur une étude expérimentale prospective quantitative et qualitative de l'évolution d'un nouveau système d'extraction d'huile essentielle et des différents rendements y afférents. La variation saisonnière des rendements obtenus est également étudiée dans le cadre de cette recherche. La période d'étude de cette expérimentation à l'échelle semi-industrielle se déroule au cours de l'année 2024, entre le mois de mars et le mois de décembre.

Plusieurs étapes de la recherche ont été entreprises pendant trois ans, à partir de 2023 à 2025. Elles concernent les revues bibliographiques, les préparations préliminaires comprenant entre autres celles des matériels et méthodes, la disponibilité des

outils de collecte des données, le suivi et l'évaluation des travaux expérimentaux, l'enregistrement, le traitement et l'analyse des données, et la rédaction de la thèse.

2.2. Récolte

Les matériels de récolte comprennent pour les trois produits généralement une fiche de collecte des informations, les petits outillages pour pouvoir effectuer la récolte en compagnie des agriculteurs travaillant en étroite collaboration avec l'équipe de la recherche, une balance, et des sacs polyéthylènes tissés pour le conditionnement et le transport jusqu'au site de production d'huiles essentielles. Les parties de végétaux faisant l'objet d'extraction d'huiles essentielles sont récoltés à partir du mois de mars au mois de décembre.

2.3. Matériel végétal

Les feuilles de *ravintsara* et de niaouli, et les rhizomes du gingembre, respectant un certain nombre de caractéristiques et de qualité, conformément aux normes en vigueur et aux attentes de ce travail de recherche, constituent le matériel végétal. Le gingembre appartient à la classification botanique suivante à savoir, le règne des Plantae, le sous-règne des Trachéobionta, la division des Angiospermes, la Classe des Monocotylédones, la sous-classe Zingibériidées, l'ordre des Zingibérales, la famille des Zingibéracées, la sous-famille des Zingibéroïdées, le genre *Zingiber*, et l'espèce *Zingiber officinale* (roscoe) [7]. Le *ravintsara* se regroupe dans le règne végétal, l'embranchement de spermaphyte, le sous-embranchement de l'angiosperme, la division des Magnoliophyta, la classe des Magnoliopsida, la sous-classe des Magnoliidae, l'ordre de laurales, la famille des Lauraceae, le genre *Cinnamomum* et l'espèce *camphora* [8]. Le niaouli entre dans la classification scientifique du règne végétal, du sous règne des eucaryotes, de l'embranchement des angiospermes, de la classe des dicotylédones, de la sous classe des rosidées, de l'ordre des myrtales, de la famille des myrtacées, du genre *Melaleuca* et de l'espèce *Quinquenervia* (Cav.) S. T. BLAKE [9].

2.4. Matériels pour l'extraction d'huile essentielle

Ils englobent d'une manière générale la balance électronique, la chaudière, la cucurbitte, le couvercle, la pipe ou le col de cygne, le condenseur, l'essencier et le thermomètre. Un système d'approvisionnement en eau particulier est utilisé pour assurer l'eau de refroidissement. Un broyeur mécanique spécial est utilisé pour pouvoir réduire en lamelles ou fragments les rhizomes de gingembre.

2.5. Méthodes d'extraction des huiles essentielles

Le matériel végétal considéré dans le cadre de cette étude respecte un certain nombre de critères pour pouvoir assurer la qualité de l'huile essentielle obtenue. La sélection du matériel végétal est entreprise avant toute opération ultérieure. Par ailleurs, les produits végétaux soumis à l'extraction d'HE ne doivent pas être affectés par des maladies ni être soumis à des phytopathologies. L'origine des feuilles et leurs caractéristiques botaniques doivent répondre au besoin de l'étude expérimentale d'extraction d'huile essentielle.

Les étapes de production d'huile essentielle concernent généralement la réception et le tri du matériel végétal, les opérations préliminaires, l'extraction proprement dite, le conditionnement et le stockage de l'huile essentielle obtenue. Les opérations préliminaires consistent à s'assurer que tous les matériels nécessaires, le matériel végétal et les paramètres y afférents répondent favorablement à la production d'huile essentielle. Au cours de cette phase, le nettoyage de l'alambic et de l'essencier est rigoureusement suivi. En outre, une période de préchauffage de l'alambic ou cuisson à vide est respectée avant l'introduction du matériel végétal.

La méthode adoptée est constituée par l'hydro-vapodistillation. Elle se conçoit comme un procédé technique d'extraction d'huile essentielle au cours duquel le matériel végétal ne se trouve pas en contact direct avec l'eau. À la sortie du condenseur, les deux liquides se séparent naturellement en raison de leur différence de densité, à travers un essencier ou vase florentin. Un conditionnement approprié permet de recueillir l'huile essentielle obtenue conformément aux normes admises.

Cette étude a entrepris une expérimentation sur l'amélioration de cette méthode d'extraction d'huile essentielle à travers l'augmentation de la performance du condenseur et de la combustion par le biais des briques réfractaires.

3. Résultats

3.1. Caractéristiques techniques de la performance du nouveau système de production des huiles essentielles à base de *ravintsara*, gingembre et niaouli

Le nouveau système utilisé met en œuvre le système d'extraction des huiles essentielles par le procédé de vapo-hydrodistillation. Ce procédé fait partie du système de distillation par entraînement à la vapeur. Il forme l'une des méthodes officielles pour l'obtention des huiles essentielles. Au niveau de ce système d'extraction, le matériel végétal est mis dans l'alambic sur une plaque perforée située à une certaine distance au-dessus du fond rempli d'eau. Par conséquent, le végétal est en contact avec la vapeur d'eau saturée. La vapeur entraîne la rupture d'un grand nombre de glandes libérant des composés aromatiques.

En effet, cette technique d'extraction constitue un processus récent de distillation dans laquelle la matière végétale et l'eau ne sont pas en contact direct. La vapeur d'eau est produite dans une chaudière séparée, puis injectée à la base de l'alambic contenant la plante. La vapeur remonte dans l'alambic comportant le matériel végétal, entraînant avec elle les composants aromatiques. L'entraînement à la vapeur, créant une pression sous vide partielle, contribue efficacement à l'extraction des huiles essentielles des espèces étudiées. À la sortie de la cuve de distillation, la vapeur d'eau enrichie d'huile essentielle traverse un serpentin dans lequel se réalise la condensation. Le condensat collecté est recueilli dans un vase florentin. Ainsi, la principale caractéristique de ce type de système réside dans le fait que le matériel végétal est séparé par une grille de l'eau bouillante. Seule la vapeur entre en contact avec lui.

Le temps d'extraction est évalué respectivement à 2 heures, 5 heures et 2 heures pour le *ravintsara*, le gingembre et le niaouli. Le débit d'eau de refroidissement est évalué à 1,75 litres par minutes.

3.1.1. Foyer et cucurbite

Ces éléments sont primordiaux dans le système d'extraction des huiles essentielles. Le foyer est conçu à partir des briques réfractaires. Ce procédé de conception augmente l'étanchéité du matériel et la conservation de l'énergie calorifique. De ce fait, les dépenses en bois de chauffe diminuent. La cucurbite constitue une cuve centrale séparée ayant à quatre niveaux à savoir l'eau, une chambre vide, un tamis, une chambre pour les matières premières, et une chambre de récupération avec couvercle. La cuve centrale possède une capacité de 500 litres.

3.1.2. Col de cygne, condenseur et essencier

Ces trois éléments prennent également une place primordiale pour le système d'extraction des huiles essentielles. En effet, le col de cygne est un tuyau de raccordement de la cucurbite avec le condenseur. En outre, le condenseur forme un système de refroidissement. Il est constitué d'un tuyau en forme spirale immergée dans un récipient d'eau de 200 litres pour assurer le refroidissement. L'essencier du nouveau système est le récipient de récupération de l'huile. Il est également dénommé « séparateur ».

3.1.3. Spécificités techniques détaillées des matériaux utilisés

Le système proposé dispose des différents éléments illustrés dans la figure suivante.

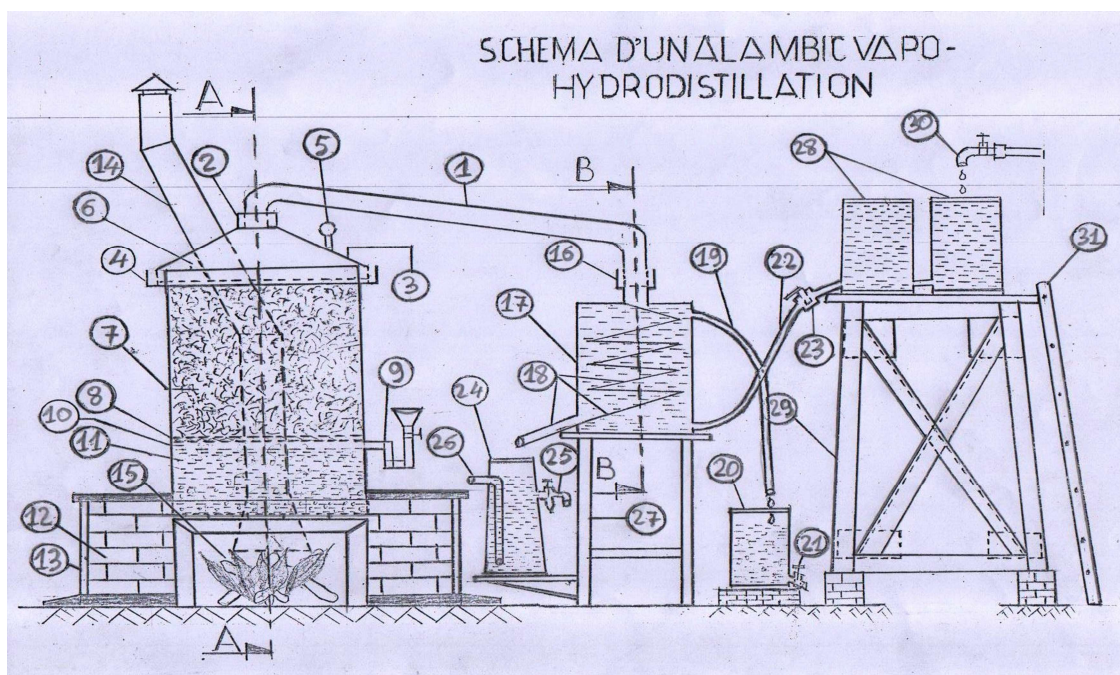


Figure 1. Nouveau système d'extraction d'huile essentielle par le procédé d'hydro-vapodistillation

La cuve centrale comporte les caractéristiques techniques suivantes, qui sont exposées dans le tableau ci-dessus.

Tableau I. Spécificités techniques de la cuve centrale

Numéros	Matériels	Spécificités techniques
CUVE CENTRAL		
1	Col de cygne	Tuyau conducteur de vapeur chaude et d'hydrolat vers le système de refroidissement ou le condenseur
2	Joint hydraulique 1	Joint hydraulique entre le col de cygne et le chapiteau
3	Chapiteau	Couvercle de la cuve principale de l'Alambic
4	Joint hydraulique 2	Joint hydraulique entre le chapiteau et la cuve principale
5	Thermomètre	Appareil de prise de température pour contrôle de la température de l'Alambic en cours de distillation
6	Compartment 4	Compartment pour la zone de récupération de la vapeur chaude avec les éléments actifs
7	Compartment 3	Compartment pour les matières premières à distiller
8	Grillage	Grillage de tamisage des matières premières pour l'extraction
9	Cohobation	Système d'adduction d'eau chaude avec vanne en cas de besoin en cours de distillation pour éviter la détérioration de l'huile ou le surchauffage de l'Alambic

10	Compartiment 2	Compartiment pour la zone de récupération de vapeur chaude
11	Compartiment 1	Compartiment d'eau chaude à bouillir pour la création de vapeur chaude (Eau bouillante)
12	Foyer	Foyer conçu en brique réfractaire pour assurer la gestion de la température du foyer
13	Support du foyer	Support du foyer en construction métallique, en fer cornière avec cerceau en fer rond pour supporter la cuve centrale
14	Cheminée	Cheminée d'aération du foyer
15	Chambre à feu	Chambre à feu pour les bois de chauffe

Le condenseur est spécifié techniquement de manière détaillée au niveau du tableau suivant.

Tableau II. Spécificités techniques du condenseur

Numéros	Matériels	Spécificités techniques
CONDENSEUR		
16	Joint hydraulique 3	Joint hydraulique entre le col de cygne et le condenseur
17	Condenseur	Appareil de refroidissement pour la transformation de la vapeur chaude en état liquide d'huile essentielle et d'hydrolat, composé d'appareil de refroidissement et d'eau froide
18	Tuyau serpentin 1	Tuyau de refroidissement en serpentin pour la transformation des vapeurs chaudes en état liquide, composé d'huile essentielle et d'hydrolat, de tuyau de sortie d'huile essentielle et d'hydrolat
19	Tuyau de sortie 2	Tuyau de sortie d'eau chaude pour le trop plein du condenseur afin d'assurer le refroidissement du condenseur
20	Fût	Fût de récupération d'eau chaude du condenseur pour la réalimentation de l'Alambic et l'usage multiple pour l'exploitation
21	Vanne 1	Vanne d'arrêt pour la gestion d'eau chaude récupérée à usage multiple pour l'exploitation
22	Tuyau d'adduction 3	Tuyau d'adduction d'eau froide pour le refroidissement du condenseur
23	Vanne 2	Vanne d'arrêt pour la gestion d'adduction d'eau froide pour le condenseur

En outre, le décanteur et les matériaux supplémentaires sont donnés dans le tableau suivant.

Tableau III. Spécificités techniques du décanteur et des matériels supplémentaires

Numéros	Matériels	Spécificités techniques
DECANTEUR		
24	Essencier	Essencier séparateur d'huile essentielle et d'hydrolat ou décanteur
25	Vanne d'huile essentielle	Vanne de récupération d'huile essentielle
26	Canaux d'Hydrolat	Canaux de récupération d'hydrolat
MATERIELS SUPPLEMENTAIRES		
Numéros	Matériels	Spécificités techniques
27	Table de fixation	Table de support du condenseur et de l'essencier
28	Citernes	Citernes de réservoirs d'eau froide pour l'alimentation de l'appareil de distillerie
29	Support métallique	Support métallique pour soutenir les citernes pour le réservoir d'eau froide pour l'extraction
30	Robinet	Pompe d'adduction d'eau froide pour l'alimentation des besoins d'eau de l'appareil de distillerie
31	Echelle	Echelle de travail pour assurer la logistique durant l'extraction

3.1.5. Spécificités techniques du système de refroidissement

Au cours de notre expérience et recherche sur l'utilisation d'unité d'extraction, le système de refroidissement d'alambic constitue la partie génératrice de production d'huile essentielle. L'innovation apportée est la mise en valeur du système de refroidissement. Le résultat de nos travaux de recherche relatif à l'amélioration du système de refroidissement ou condenseur d'un alambic, utilisant comme procédé le vapo-hydrodistillation, a été inspiré de la structure et du fonctionnement d'un radiateur. Le nouveau système proposé comporte trois niveaux, qui sont successivement définis par le premier niveau, le deuxième niveau et le troisième niveau.

- **Premier niveau**

Il détient deux structures à savoir :

- la partie supérieure composée du capteur de col de cygne combiné d'une jointure hydraulique avec un canal pour joint de 3 cm et d'une hauteur de 15 cm ;
- le tube de ralliement (Tube inox de 7cm de hauteur et diamètre 50) du premier niveau et du deuxième niveau formant la boîte B1.

- **Deuxième niveau**

Il contient :

- la boîte B1 regroupant la première chambre de refroidissement avec la forme cubique de longueur 33cm, de largeur 12cm et de hauteur 15cm. Elle est travaillée à partir d'une tôle inoxydable de 15/10 d'épaisseur pour avoir une vitesse de

refroidissement rapide. Cette boîte comporte une simple entrée de vapeur chaude, au-dessus de la boîte, et de trois sorties en dessous, afin de réduire le flux de vapeur, en vue d'avoir le même principe de refroidissement.

- Trois tubes de ralliement, constitués de tube inox de 30 cm de hauteur et de diamètre 50cm, se structurent de la boîte B1 au deuxième niveau, à celle de la deuxième chambre B2 au troisième niveau. L'objectif général de ce type de conception consiste à partager le maximum de flux de vapeur chaude dans la première chambre, afin de la refroidir le plus rapidement dès son arrivée à la deuxième chambre.

- Troisième niveau

La boîte B2 forme la deuxième et dernière chambre de refroidissement, avec la même dimension et la forme cubique que celle de B1. Elle est également fabriquée à partir d'une tôle inoxydable de 15/10 d'épaisseur, dans le but d'avoir une vitesse de refroidissement rapide. Elle est munie de trois entrées de vapeur au-dessus et d'un seul tuyau de sortie à la fin du système de refroidissement, avec une dimension de tuyau inoxydable de 40 cm et de diamètre 40cm en dessous, qui est la sortie finale des huiles essentielles et des eaux florales.

En vue d'obtenir un refroidissement maximal dans le système du condenseur, l'entrée d'eau froide fonctionne à contre-courant du circuit de vapeur chaude. Autrement dit, l'eau froide entre en bas du système et sort en haut du système.

L'innovation expérimentée et proposée dans le cadre de cette étude est illustrée dans la figure suivante.

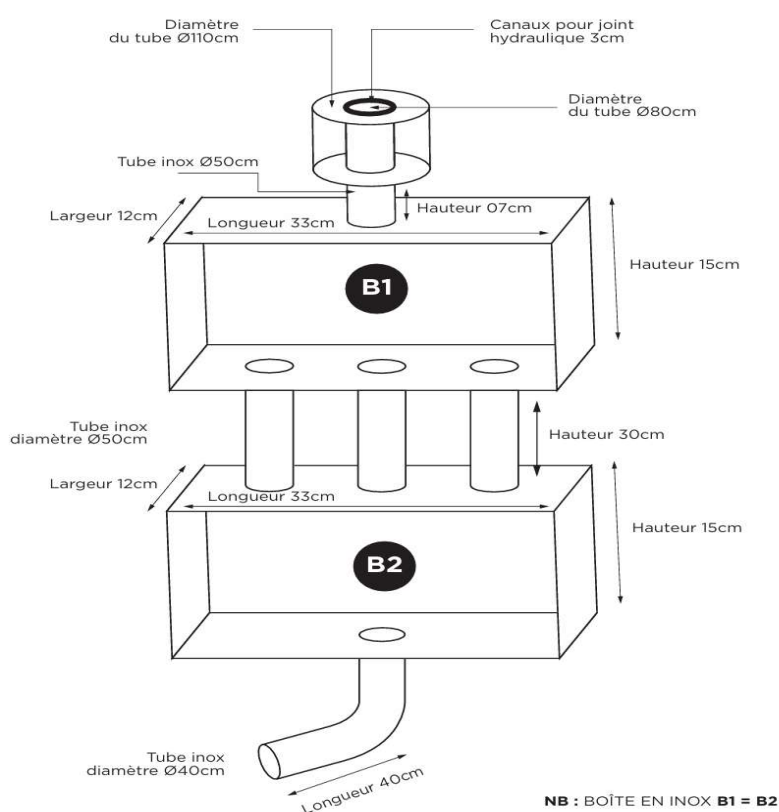


Figure 2. Amélioration du système de refroidissement

3.2. Evolution des rendements

Les quantités de matières premières chargées dans l'alambic et le nombre de distillations sont similaires pour les types d'espèce faisant l'objet de la présente étude. La quantité totale annuelle de matières premières employées dans cette étude se

chiffre à 45 tonnes. L'expérimentation dans le cadre de cette recherche a entrepris 180 distillations par an, à raison de 18 distillations par mois pour les trois espèces confondues, à partir du mois de mars au mois de Décembre 2023.

3.2.1. Analyse descriptive de l'évolution mensuelle des rendements de l'huile essentielle de *ravintsara*

L'étude montre que le rendement en huile essentielle de *ravintsara* est le plus élevé au mois de décembre (Maximal de 2,40%, avec une teneur moyenne de 2,24%) et diminue progressivement jusqu'au mois d'août. Le mois de décembre correspond au stade de fructification et de feuillaison, au cours duquel les feuilles atteignent leur taille maximale d'une manière générale.

La courbe suivante indique l'évolution du rendement moyen par mois de l'huile essentielle de *ravintsara*.

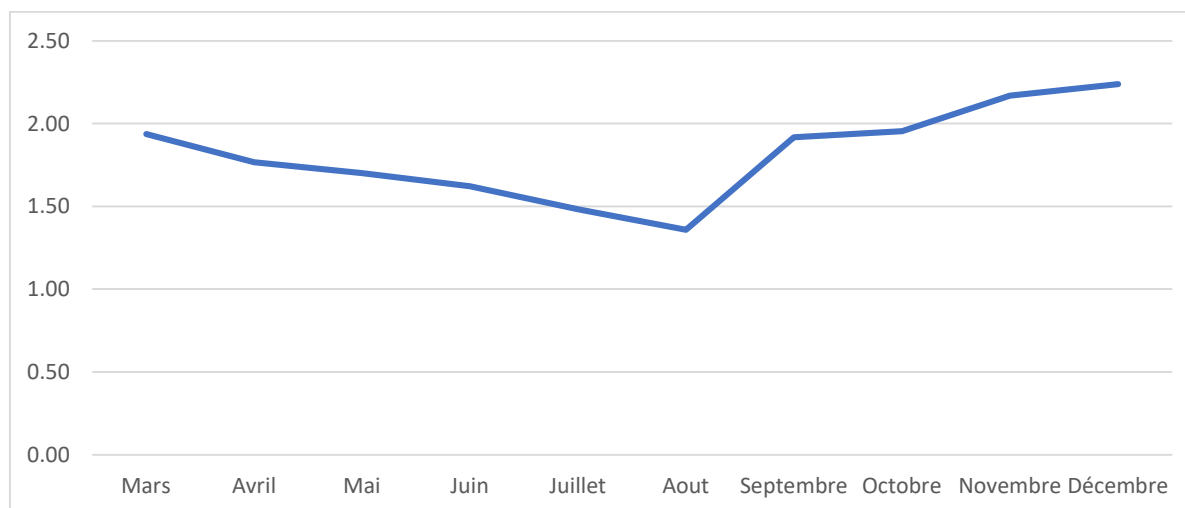


Figure 3. Rendement moyen de l'huile essentielle de *ravintsara*

3.2.2. Analyse descriptive de l'évolution mensuelle des rendements en huile essentielle de *niaouli*

Les informations obtenues renseignent que les rendements en huile essentielle de *niaouli* sont élevés du mois d'octobre au mois de mars, et peuvent atteindre 2,92% en moyenne au mois de décembre, avec une teneur maximale de 2,73%.

Le rendement moyen de l'huile essentielle de *niaouli* en fonction de la saison est présenté à travers la figure suivante.

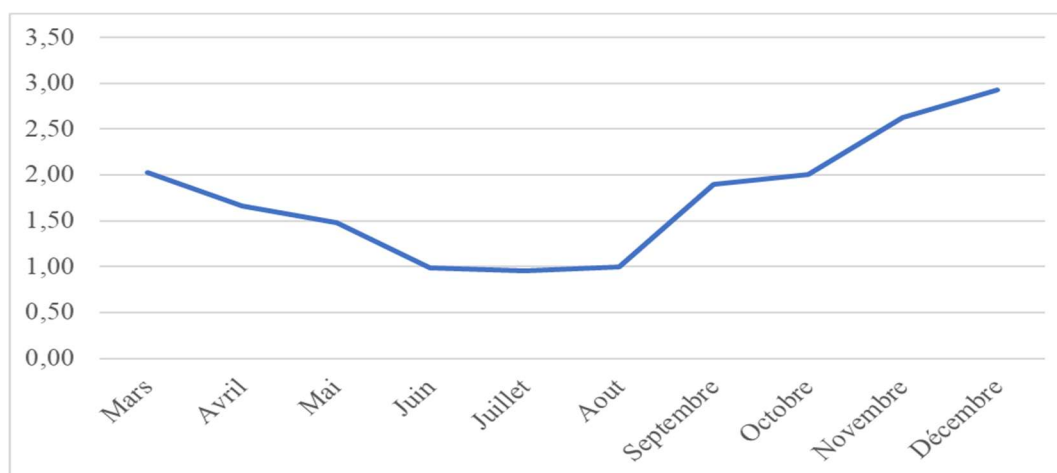


Figure 4. Représentation graphique du rendement moyen de l'huile essentielle de *niaouli*

3.2.3. Analyse descriptive de l'évolution mensuelle des rendements en huile essentielle de gingembre

Les résultats recueillis indiquent que les rendements moyens en huile essentielle de gingembre sont élevés entre les mois d'août à mars et atteignent une teneur maximale de 2,13% au mois de décembre, avec une teneur moyenne de 2,02%. Cette tendance dérive, d'après un certain nombre d'auteurs, de la période de maturité des rhizomes. Le rendement moyen de l'huile essentielle de gingembre selon la saison est exprimé dans la figure suivante.

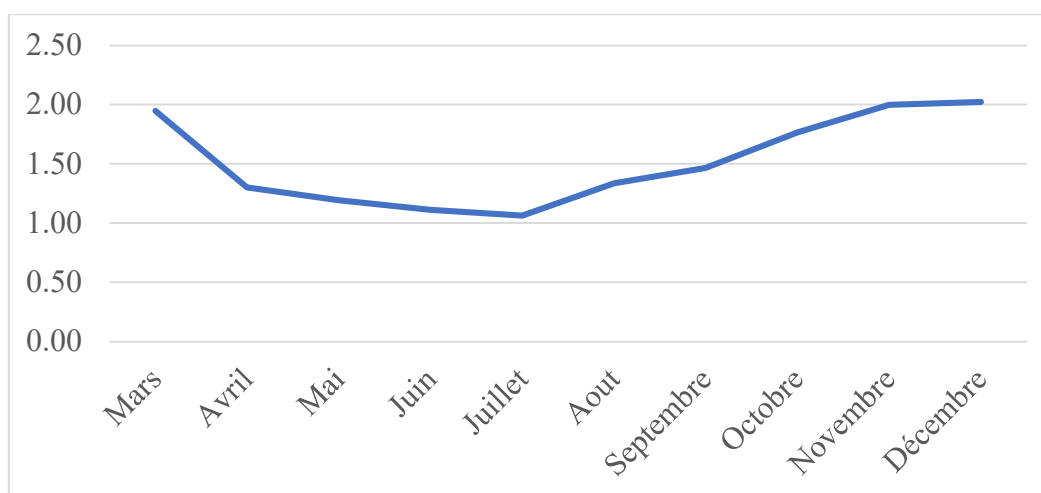


Figure 5. Rendement moyen de l'huile essentielle de gingembre

4. Discussions

Le nouveau système utilisant le procédé de vapo-hydrodistillation pour l'extraction des trois types d'huile essentielle dans le cadre de cette étude présente plusieurs innovations. La performance de la combustion du système est assurée en partie par l'utilisation de briques réfractaires, qui sont mondialement connues pour leur capacité de stockage thermique et d'accompagnement au transfert thermique. Des études entreprises à l'échelle mondiale montrent l'efficacité des matériaux réfractaires dans les procédés d'incinération [10]. Ces matériaux réfractaires sont employés dans la présent travail de recherche pour accroître le transfert de chaleur lors du processus de combustion des alambics d'extraction des huiles essentielles. Cette démarche permet l'optimisation de la quantité de vapeur fournie dirigée vers le condenseur et l'efficacité de l'extraction des huiles essentielles.

Par ailleurs, le système de condensation ou de refroidissement des vapeurs d'eau recueillies de ce nouveau système de distillation est structuré par deux tubes rectangulaires rallongés par trois tubes circulaires longitudinaux. Cette structure augmente la surface d'échange de chaleur et une progression optimale du flux de vapeur. En effet, la quantité de chaleur échangée est liée au coefficient global de transfert thermique, à la différence de température entre les deux fluides et à la surface d'échange. Cette croissance de la surface d'échange permet d'une manière générale de générer un contact thermique prolongé, une extraction plus efficace de la chaleur latente de vaporisation et une transformation complète de la vapeur en liquide. Plusieurs études sur les échangeurs de chaleur [11] indiquent également que l'augmentation de la surface d'échange, à travers un certain nombre de structures géométriques du condenseur, entraîne l'accroissement de l'efficacité du mécanisme de condensation. Par conséquent, ce phénomène physique permet la performance du rendement en HE et contribue à promouvoir sa qualité.

En outre, le débit d'eau de refroidissement apporte également des améliorations sur la quantité et la qualité de l'huile essentielle obtenue d'après un certain nombre d'études. En effet, une expérimentation menée à l'Indonésie a montré un bon

résultat sur l'utilisation optimale d'eau de refroidissement dans le système de condensation employant la distillation à la vapeur pour l'extraction d'huile essentielle, avec une eau de refroidissement correspondant à 1,74 litres par minutes [12]. Cette étude présente des similarités avec la présente recherche, en ce sens que l'eau de refroidissement utilisée pour ce nouveau système est de 1,75 litres par minutes. Cet aspect caractéristique de l'eau de refroidissement employée contribue à l'amélioration du rendement et de la qualité de l'huile essentielle.

Le transfert progressif du flux de vapeur condensée à travers les trois tubes circulaires longitudinaux apporte l'optimisation de la durée de distillation. D'après plusieurs recherches entreprises, l'optimisation de la durée de distillation augmente la quantité et qualité des produits obtenus, en l'occurrence la qualité de l'huile essentielle recueillie [13]. Cette tendance à l'efficacité du système de condensation améliore le niveau d'extraction en huile essentielle et diminue les risques de pertes y afférents.

Ces différentes thèses constituent des éléments déterminants le rendement de l'extraction des huiles essentielles de *ravintsara*, de niaouli et de gingembre. En effet, d'après les résultats obtenus par cette étude, les rendements en huile essentielle de *ravintsara*, de niaouli et de gingembre sont élevés par rapport aux autres études similaires. Pour le *ravintsara*, le rendement moyen se situe entre 1,36% à 2,24%, avec un maximum de 2,40% au mois de décembre. Il reste supérieur à 1,92% entre les mois de septembre au mois de mars, avec un minimal de 1,87% au mois de septembre. Les rendements moyens les plus élevés se situent entre les mois d'octobre et de mars. Des études similaires entreprises par un auteur scientifique à Madagascar avancent une teneur moyenne en huile essentielle de *ravintsara* de 1,73% pour des plantes âgées de 5 ans et diminue progressivement avec l'âge chronologique de la plante [8]. Ce stade de développement d'un rendement maximal en huile essentielle de *ravintsara* s'étale entre les mois de novembre à mars. Cette période de production maximale correspond au stade de feuillaison ou de fructification pour les plantes plus jeunes. Au cours de cette période, le rendement maximal est atteint pendant les mois de novembre et de décembre [8]. Ces résultats présentent des analogies avec la présente thèse. Des études entreprises par d'auteur scientifique révèlent un rendement variant de 0,7% à 1% [14]. Ces informations mettent en exergue que les rendements obtenus dans le cadre de la présente thèse est largement supérieure à ceux des autres études réalisées par d'autres travaux de recherche.

Concernant l'huile essentielle de niaouli, le rendement moyen évolue de 0,95% à 2,92%, avec une teneur maximale de 3,02% au mois de décembre. Une hausse des rendements moyens est observée, de 1,90% à 2,92%, du mois de septembre au mois de décembre. Une baisse des rendements moyens est constatée à partir du mois d'avril. Des études similaires effectuées au Bénin mettent en exergue l'augmentation des rendements en huile essentielle de niaouli au cours des saisons de pluie, et une baisse de ceux-ci lors des grandes saisons sèches [15]. Cette thèse présente des analogies avec la présente étude. À Madagascar, la période de floraison et de fructification se situe entre les mois de novembre au mois de mars [16]. Par ailleurs, plusieurs études avancent des rendements moyens évalués à 0,52% à 1%, utilisant l'extraction par hydrodistillation [9], de 0,2% à 1,1% avec une moyenne de 0,8% [5]. Ces résultats montrent des similarités avec le présent travail de recherche, surtout pour certaines périodes de récolte. Toutefois, cette nouvelle technologie utilisant le procédé de vapo-hydrodistillation paraît donner des rendements exceptionnels pour l'huile essentielle de niaouli.

Enfin pour l'huile essentielle de gingembre, le rendement moyen varie de 1,07% à 2,02%, avec une teneur maximale de 2,13% au mois de décembre. Une augmentation significative de 1,77% à 2,02% est décelée à partir du mois d'octobre au mois de décembre. Au mois de mars, le rendement moyen est évalué à 1,95%. Une diminution du rendement moyen est observée entre les mois d'avril et de juillet. Le début de la hausse du rendement moyen est constaté au cours du mois d'août. Une étude similaire au présent travail de recherche effectuée à Madagascar stipule que les rendements obtenus en HE de gingembre varient de 0,77% à 2% [4]. Une étude comparative *in vitro* entreprise en Algérie révèle un rendement en gingembre de 1,47% par hydrodistillation [17]. Ces résultats montrent que la méthode d'extraction par vapo-hydrodistillation rend optimale et plus élevée l'extraction en huile essentielle de gingembre.

5. Conclusion

En guise de conclusion, l'utilisation du nouveau système innovant d'extraction d'huile essentielle par le procédé d'hydro-vapodistillation augmente les rendements en huile essentielle de *ravintsara*, niaouli et gingembre. Cette découverte exceptionnelle contribuera à promouvoir l'agriculture et l'alimentation, le développement durable de Madagascar et l'atteinte des objectifs de développement durable à l'horizon 2030.

Références

- [1] Hawkins, A.F.A et Goodman, S.M. (2003). Introduction to the Birds. In S. M. Goodman and J.P. Bedstead (eds.). The Natural History of Madagascar. The University of Chicago Press, 1019p.
- [2] Callmander, M.W., Phillipson, P. B., Schatz, G. E., Andriambololonera, S., Rabarimanarivo, M., Rakotonirina, N., Raharimampionona, J., Chatelain, C., Gautier, L. et Lowry IL, P. P. (2011). The endemic and non-endemic vascular flora of Madagascar updated. In Plant Ecology and Evolution, 144 : 121-125.
- [3] Andrianoelisoa H., Menut C. et P. Danthu P. (2012). *Ravensara aromatica* ou *Ravintsara* : une confusion qui perdure parmi les distributeurs d'huiles essentielles en Europe et en Amérique du Nord. © Springer-Verlag France 2012. Phytothérapie (2012) 10 :161–169
- [4] Rasolofonirainy N., N., F. (2023). Étude de potentialités de l'huile essentielle de zinziber officinale (gingembre) dans la protection des aliments contre les microbes : Cas de Viande hachée de Bœuf. Mémoire de fin d'études. Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Madagascar, p. 33.
- [5] Ramanoelina P., A., R., Gaydou, E., M. et Bianchini, J., P. (2005). Caractérisation des huiles essentielles industrielles de niaouli (*Melaleuca quinquenervia*) de Madagascar - Propositions d'Avant-projet de Normes, pp. 59-91.
- [6] Raharirina, V. (2009). Valorisation économique de la biodiversité par les contrats de bioprospection et la filière huiles essentielles : le cas de Madagascar. Economies et finances. Université de Versailles, Saint Quentin en Yvelines, France, 2009, p. 424.
- [7] Amari S. (2016). Étude phytochimique et évaluation de l'activité antibactérienne et antioxydante de deux extraits de la plante Zingiber officinale. Mémoire de fin d'étude. Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen. (46), pp 11.
- [8] Rasendramiadana, F. (2009). Influence de l'âge de la feuille et de la plante sur le rendement et la qualité de l'huile essentielle d le rendement et la qualité de l'huile essentielle de *ravintsara* (*cinnamomum camphora l.*). Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies en Biologie et Ecologie Végétales, option : Physiologie Végétale, Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, Département de Biologie et Ecologie Végétales, p.74.
- [9] Raharison N., N., F. (2022). Étude de la variabilité suivant les lieux de récolte des huiles essentielles de melaleuca quinquenervia (niaouli) provenant d'Antananarivo, de Toamasina et de Manakara. Université d'Antananarivo-Ecole Supérieures Polytechnique d'Antananarivo, p. 80.
- [10] Wu K., Zhang H., Zhang Y., Han S., Shen X. (2025). Analyse des caractéristiques thermomécaniques de la structure en briques réfractaires présentant différentes propriétés de matériaux et paramètres de structure dans les incinérateurs. Modélisation thermomécanique. École de génie civil, Université Jiaotong de Pékin, Pékin 100044, Chine. Volume 42. Consulté le 10 Décembre 2025, disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.111166>
- [11] Zhang, J., Zhou, N., Zhang, G. et Tian, M. (2022). Numerical and experimental studies of flow and heat transfer characteristics in a plate heat exchanger with multi-chevron corrugate furrows. Numer. Heat Transf. Part A Appl., pp.71–82.
- [12] Smith, H., Assagaf, M., Suwarda, R.,1 Budiyanoto, A., Adinegoro, H., Lamhot Parulian Manalu, LP., Rienoviar, Rosniati, Manoi, F., Loppies, JE., Sitti Ramlah, S., Sunarmani, Widayanti, SM., Setyadjit, Marwati, T., Setyawan, N., Tjahjohutomo, R.,

Syaefullah, E., Risfaheri and Hindawi, AB., B. (2024). The Flow Rate of the Condenser Cooling Water in the Distillation Process Increases the Quality and Quantity of Patchouli Oil. *The Scientific World Journal*, Volume 2024, Article ID 9844242, p.7.

[13] Johan, VS., Harun, N., Dewi, YK., Imaeng, TR. (2025). Effect of Distillation Duration on Patchouli Oil Utilizing Steam and Water Techniques. *Proceedings of the International Conference on Agricultural Strategy for Sustainability (ICASS)*. October 15–16, 2024 – Pekanbaru, Indonesia, Volume 1, Number 1 (2025), pp.73-78.

[14] Mansard, M. (2019). Huile essentielle de Ravintsara. L'huile essentielle de *Ravintsara*, immunostimulante, puissamment antivirale et anti-infectieuse, se révèle très utile en cas d'affections virales d'ordre respiratoire et digestive. Elle est produite à Madagascar par distillation des feuilles d'une Lauracée, *Cinnamomum camphora*, appelée aussi faux camphrier. Elsevier Masson SAS. *Actualités pharmaceutiques* n° 585, avril 2019, pp.57-59.

[15] Gbenou J., D. (1999). Huiles essentielles de quelques plantes aromatiques des genres eucalyptus et melaleuca (myrtacées) et chenopodium (chenopodiacees) du Bénin : variations inter et intraspécifiques du rendement et de la composition chimique et propriétés pharmacodynamiques. Thèse de doctorat en vue de l'obtention du grade de docteur en chimie organique des substances naturelles, spécialité : sciences des matériaux. Université Nationale du Bénin, Faculté des Sciences et Techniques, Département de chimie. N° d'Enregistrement UNB/DSM/CM/99/05/01, pp. 331.

[16] Andriampeno, O., N. (2006). La filière « huiles essentielles » à Madagascar : le développement d'Ambila Lemaitso grâce à l'exploitation du niaouli. Université d'Antananarivo, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Département Géographie, formation spécialisée en environnement et aménagement, p.128.

[17] Khebbeb L. et Bouanaka H. (2018). Étude comparative, in vitro, entre l'effet des antifongiques de synthèse et les huiles essentielles d'*Allium sativum* et *Zingiberis rhizoma* sur deux espèces d'intérêt médical : *C. albicans* et *A. niger*. Université des Frères Mentouri Constantine 1, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Département Microbiologie, Algérie. Mémoire de fin d'études pour l'obtention de Master, p.68.