

Étude De La Composition Et La Qualité En Huile Essentielle À Madagascar Avec Un Nouveau Système D'extraction : 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
tsvalaka@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. E-mail : rjoelynirina@yahoo.fr



Résumé – La présente étude vise à déterminer le niveau d'augmentation des rendements obtenus et de préservation des composants chimiques primordiaux et de la qualité des extraits des espèces végétales de ravintsara, niaouli et gingembre, à travers l'utilisation d'un nouveau système d'extraction d'huile essentielle, afin de promouvoir la science et la technologie, développer de manière durable Madagascar et contribuer à l'atteinte des objectifs de développement durable à l'horizon 2030. Les résultats montrent que le nouveau procédé d'extraction augmente les teneurs en huile essentielle, pouvant atteindre 2,40% pour l'extraction de ravintsara, 3,02% pour celle de niaouli, et 2,13% pour l'huile essentielle de gingembre. La préservation de la teneur en composant chimique caractéristique de chaque huile essentielle est obtenue, en l'occurrence le 1.8-cinéole (55,97%) et le 1.8-cinéole (39,09%) respectivement pour les plantes de ravintsara et de niaouli, et l' α -zingibérène (32,51%) pour la plante de gingembre. Par ailleurs, les densités pour les huiles essentielles de niaouli (0,919), de ravintsara (0,911) et de gingembre (0,883), ainsi que les indices de réfraction évalués respectivement à 1,470, 1,465 et 1,486, sont maintenus lors de l'emploi du nouveau système d'extraction.

Mots-clés : Huile essentielle, ravintsara, niaouli, gingembre, plantes aromatiques.

Abstract - This study aims to determine the level of increase in yields obtained and preservation of key chemical components and quality of extracts from ravintsara, niaouli and ginger plant species, through the use of a new essential oil extraction system, in order to promote science and technology, develop sustainably in Madagascar and contribute to the achievement of the Sustainable Development Goals by 2030. The results show that the new extraction process increases essential oil content, reaching 2.40% for ravintsara extraction, 3.02% for niaouli, and 2.13% for ginger essential oil. The preservation of the characteristic chemical component content of

each essential oil is achieved, specifically 1,8-cineole (55.97%) and 1,8-cineole (39.09%) for ravintsara and niaouli plants, respectively, and α -zingiberene (32.51%) for ginger. Furthermore, the densities for niaouli (0.919), ravintsara (0.911), and ginger (0.883) essential oils, as well as the refractive indices of 1.470, 1.465, and 1.486, respectively, are maintained when using the new extraction system.

Keywords: Essential oil, ravintsara, niaouli, ginger, aromatic plants.

1. Introduction

Les ressources naturelles en faune et flore commencent à se dégrader du fait des crises et changements climatiques observés à travers le monde. À Madagascar, plusieurs ressources naturelles et espèces biologiques, qui sont considérées comme des richesses importantes en capitaux naturels du pays, existent de manière prépondérante, qualifiant l'une des plus grandes îles à l'échelle planétaire de mégabiodiversité. De nombreuses recherches scientifiques montrent que 5% de la biodiversité mondiale appartient à la grande île d'une part, et d'autre part, le taux d'endémisme excède les 80%, aussi bien pour la faune que pour la flore. Les espèces florales contribuent fortement à promouvoir les intérêts scientifiques, socio-économiques et sanitaires inestimables [1]. En effet, 11. 220 espèces de plantes d'Angiospermes, dont 84% sont endémiques, poussent à Madagascar [2].

Les plantes de *ravintsara* [3], gingembre [4] et *niaouli* [5] constituent des espèces végétales présentant des bénéfices significatifs multidimensionnels à Madagascar. Elles concourent l'amélioration de la vie socio-économique [6] et environnementale de la population locale. En outre, elles possèdent différentes vertus thérapeutiques et pharmacologiques efficaces pour leur santé publique. De ces faits, les huiles essentielles, extraits aromatiques de ces plantes issus de divers procédés technologiques, renferment des substances pouvant avoir des propriétés anti-infectieuses, anti-inflammatoires, antioxydantes et anesthésiantes.

En revanche, malgré la diversité des profits extraits à partir de ces huiles essentielles, la problématique de la recherche réside dans le fait que les procédés d'extraction d'huile essentielle n'arrivent pas suffisamment à optimiser en même temps le rendement en huile essentielle et la préservation des composants essentiels et la qualité y afférents. Ce constat ne permet pas de générer des activités locales bénéficiaires et durables sur le plan socio-économique et environnemental à Madagascar. Ainsi, la présente étude, proposant un système amélioré et plus performant d'extraction de huiles essentielles, vise à déterminer le niveau d'augmentation des rendements obtenus et de préservation des composants chimiques primordiaux et de la qualité des extraits de ces espèces végétales, à travers ce procédé innovant, afin de promouvoir la science et la technologie, développer de manière durable Madagascar et contribuer 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 spermatophyte, 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'huile essentielle 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 utilise le système d'extraction des huiles essentielles par le procédé de vapo-hydrodistillation. Il se caractérise par le fait que la matière végétale et l'eau ne se trouvent pas en contact direct. Ainsi, la vapeur d'eau produite dans une chaudière séparée, puis injectée à la base de l'alambic contenant la plante, remonte dans l'alambic comportant le matériel végétal, et entraînent avec elle les composants aromatiques. 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.

Le système proposé se compose principalement du foyer, de la cucurbite, du col de cygne, du condenseur et de l'essencier. Il apporte une innovation au niveau du système de refroidissement, qui est inspiré, dans le cadre de ce travail de recherche, de la structure et du fonctionnement d'un radiateur. Par conséquent, ce système de refroidissement possède trois niveaux, pouvant promouvoir aussi bien le rendement en huile essentielle mais également les composants chimiques et la qualité y afférents.

La figure suivante montre l'innovation technologique du système de refroidissement.

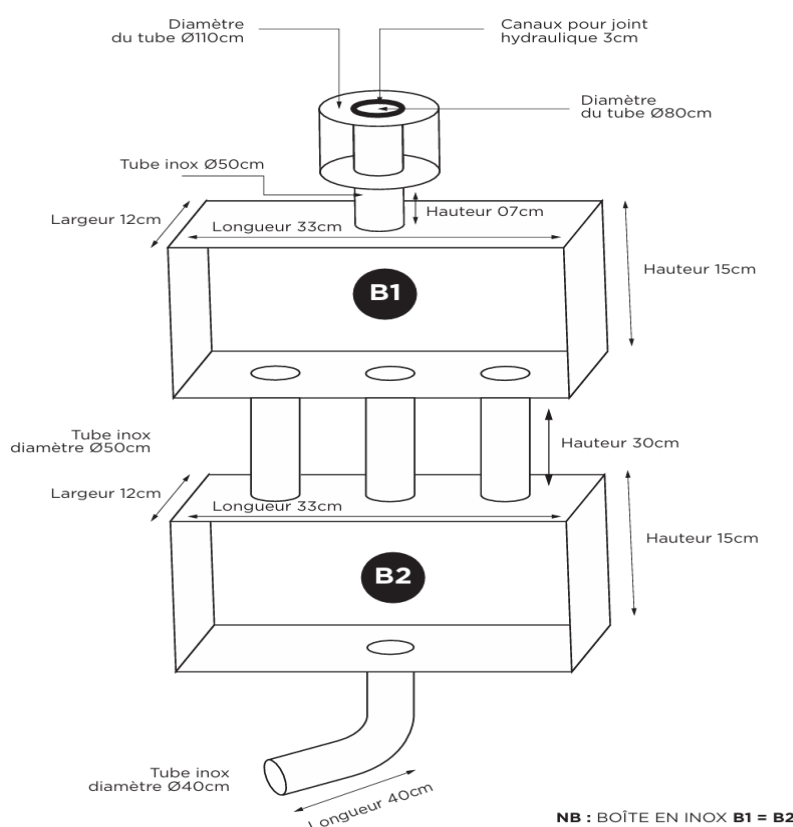


Figure 1. Amélioration du système de refroidissement

Par ailleurs, 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 [10].

3.2. Rendements, composition chimique et qualité des huiles essentielles de *ravintsara*, niaouli et gingembre

L'utilisation du nouveau système ont permis d'obtenir des rendements élevés en huiles de *ravintsara*, niaouli et gingembre. Par ailleurs, les principales compositions chimiques et la qualité des huiles essentielles collectées sont préservées d'une manière générale.

3.2.1. Rendements en huile essentielle de *ravintsara*, niaouli et gingembre

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude révèlent que le rendement en huile essentielle de *ravintsara* peut atteindre une teneur maximale de 2,40% au cours du mois de décembre, avec une teneur moyenne variant de 1,36% à 2,24%. Les rendements en huile essentielle de niaouli peuvent arriver à 3,02% au mois de décembre, avec une teneur moyenne variant entre 0,95% à 2,92%. Quant aux huiles essentielles de gingembre, elles possèdent des rendements évalués à une teneur maximale de 2,13% au mois de décembre, avec une teneur moyenne variant de 1,07% à 2,02%.

3.2.2. Composition chimique des huiles essentielles de *ravintsara*, niaouli et gingembre

Concernant les huiles essentielles de *ravintsara*, le taux moyen de 1.8-cinéole+ se chiffre à 55,97% et se trouve à un niveau largement supérieur aux autres constituants. Ce chémotype est suivi par le sabinène (14,92%), l' α -terpinéol (8,29%) et l' α -pinène (5,82%). La figure suivante met en évidence le fait que 1.8-cinéole+ forme le principal chémotype identifié dans l'huile essentielle de *ravintsara*.

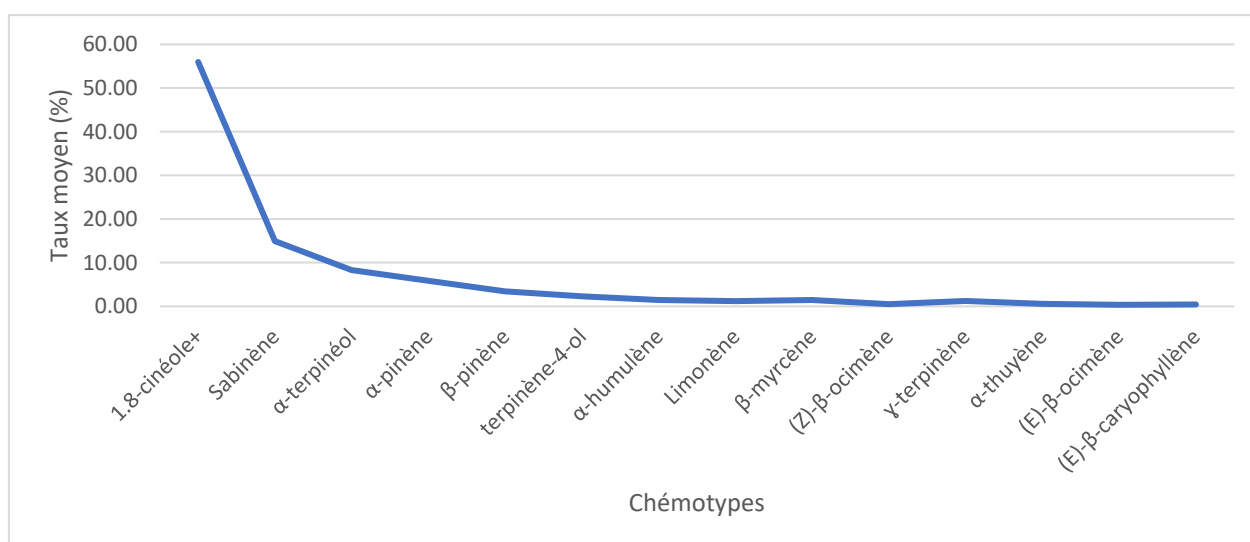


Figure 2. Teneur moyenne des principaux composants chimiques de l'huile essentielle de *ravintsara*

Pour les huiles essentielles issues des feuilles de niaouli, elles se composent d'un taux moyen de 1.8-cinéole+ de 39,09%, qui forme le composant chimique majoritaire de l'huile essentielle de niaouli. Il est suivi par le Viridiflorol (17,62%), l' α -pinène (8,51%), le limonène (7,40%), l' α -terpinéol (7,07%) et l'(E)-nérolidol (5,94%).

La figure suivante met en exergue la prépondérance de 1.8-cinéole+ dans la composition chimique de l'huile essentielle de niaouli.

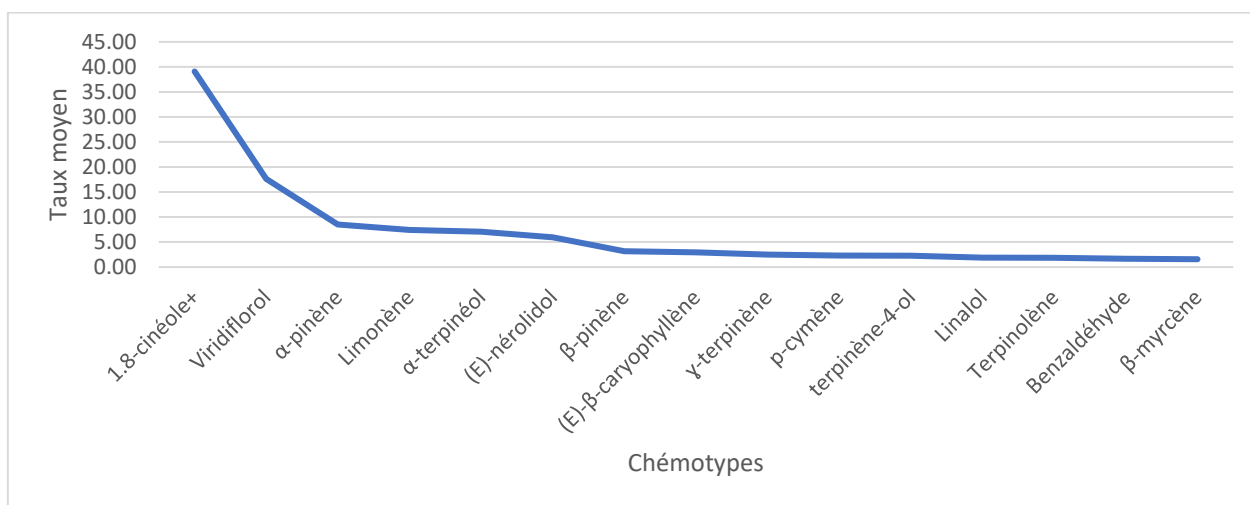


Figure 3. Teneur moyenne des principaux types de chémotype dans l'huile essentielle de niaouli

Enfin, la présente étude montre que la teneur moyenne de l' α -zingibérène est de 32,51%, et ce composant chimique forme le constituant majoritaire de l'huile essentielle de gingembre. L'ar-curcumène ayant un taux moyen de 8,48% détient la seconde place. Il est suivi par le camphène (8,23%), le β -phellandrène (7,18%) et le β -sesquiphellandrène (6,88%).

La prépondérance l' α -zingibérène dans la composition chimique de l'huile essentielle de gingembre est représentée dans le cadre de la figure ci-dessous.

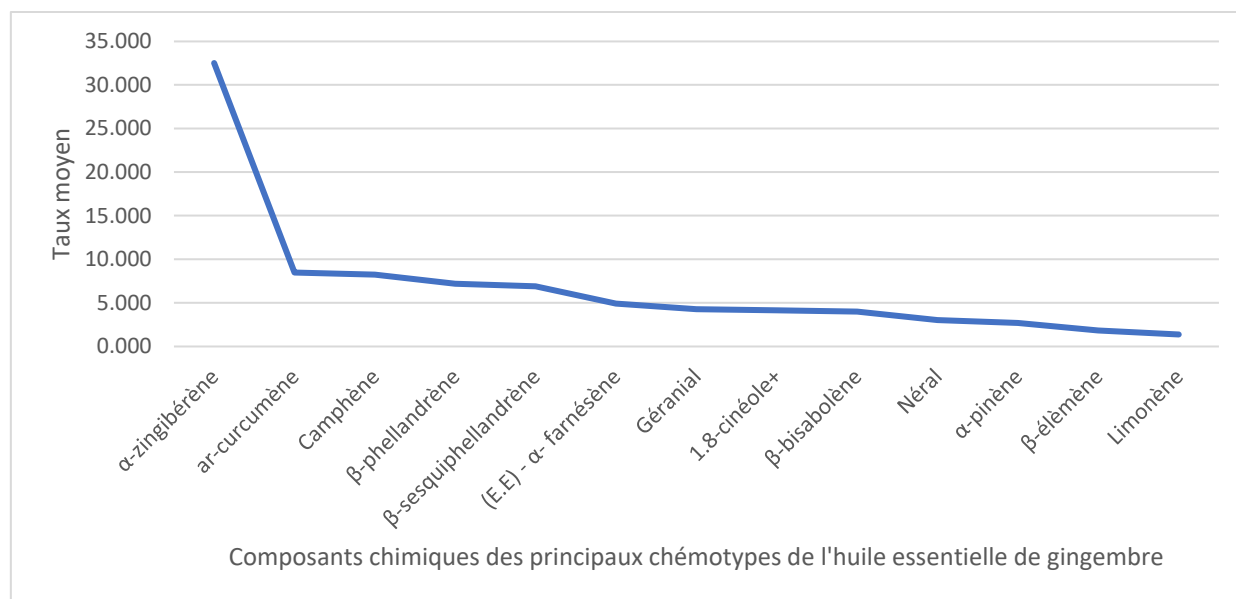


Figure 4. Teneur moyenne des principaux chémotypes dans l'huile essentielle de gingembre

3.2.3. Analyse des densités et indices de réfraction des huiles essentielles de de ravintsara, niaouli et gingembre

L'analyse des densités et indices de réfraction des trois types d'huile essentielle, faisant l'objet de cette recherche donne les résultats suivants.

Tableau I. Densités des huiles essentielles de *ravintsara*, *niaouli* et de *gingembre*

Variables	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
<i>Ravintsara</i>	0,900	0,925	0,911	0,009
<i>Niaouli</i>	0,910	0,935	0,919	0,008
<i>Gingembre</i>	0,872	0,892	0,883	0,007

Les résultats montrent une densité moyenne de 0,919 pour l'huile essentielle de *niaouli*. Cette teneur moyenne est relativement plus élevée que celle de l'huile essentielle de *ravintsara* évaluée à 0,911. L'huile essentielle de *gingembre* possède la plus basse densité moyenne (0,883).

Tableau II. Indices de réfraction des huiles essentielles de *ravintsara*, *niaouli* et de *gingembre*

Variables	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
<i>Ravintsara</i>	1,460	1,470	1,465	0,003
<i>Niaouli</i>	1,464	1,480	1,470	0,005
<i>Gingembre</i>	1,480	1,490	1,486	0,003

Les informations ci-dessus renseignent que l'huile essentielle de *gingembre* comporte un indice de réfraction moyen élevé de 1,486 par rapport à ceux des deux autres huiles essentielles. L'huile essentielle de *niaouli* contient un indice de réfraction relativement plus élevé, correspondant à 1,470, par rapport à celui de l'huile essentielle de *ravintsara* (1,465).

4. Discussions

4.1. Influence de la nouvelle technologie d'extraction sur les rendements en huile essentielle

L'innovation apportée dans ce procédé d'extraction d'huile essentielle réside dans l'amélioration du système de condensation ou de refroidissement des vapeurs d'eau recueillies, qui se structure à travers deux tubes rectangulaires rallongés par trois tubes circulaires longitudinaux. Cette géométrie accroît la surface d'échange de chaleur et entraîne une progression optimale du flux de vapeur. En effet, un lien existe entre la quantité de chaleur échangée et, le coefficient global de transfert thermique, la différence de température entre les deux fluides et la surface d'échange. De ce fait, l'augmentation de la surface d'échange permet généralement un contact thermique prolongé, une extraction plus efficace de la chaleur latente de vaporisation et une transformation complète de la vapeur en liquide. De nombreuses recherches sur les échangeurs de chaleur ont confirmé que l'augmentation de la surface d'échange, à travers un certain nombre de structures géométriques du condensateur, conduit à l'accroissement de l'efficacité du mécanisme de condensation [11]. Par ailleurs, le débit d'eau de refroidissement est évalué à 1,75 litres par minutes, qui présente une similarité avec une expérimentation entreprise en Indonésie démontrant un résultat optimal en utilisant une eau de refroidissement du système de condensation de l'extraction d'huile essentielle, correspondant à 1,74 litres par minutes [12], contribuant 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, qui, d'après plusieurs recherches entreprises, augmente la quantité et qualité de l'huile essentielle recueillie [13].

En effet, d'après les résultats obtenus, les rendements en huile essentielle de *ravintsara*, de *niaouli* et de *gingembre* sont élevés par rapport aux autres études similaires. Concernant le *ravintsara*, le rendement moyen se situe entre 1,36% à 2,24%, avec un maximum de 2,40% au mois de décembre. D'autres recherches scientifiques réalisées à Madagascar montrent une teneur en huile essentielle de *ravintsara* de 1,73%, qui équivaut au stade de développement maximal en huile essentielle de *ravintsara* 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].

Pour 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. Des études similaires entreprises au Bénin présentent des analogies avec cette étude, en ce sens qu'elles

montrent 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]. À Madagascar, la période de floraison et de fructification se déroule entre les mois de novembre au mois de mars [16]. En outre, plusieurs études avancent des rendements moins élevés que la présente étude, de 0,52% à 1% [9], et de 0,2% à 1,1% avec une moyenne de 0,8% [5]. Par conséquent, cette nouvelle technologie utilisant le procédé de vapo-hydrodistillation donnerait des rendements exceptionnels pour l'huile essentielle de niaouli.

Cette nouvelle technologie d'extraction d'huile essentielle produit un rendement moyen entre 1,07% à 2,02%, avec une teneur maximale de 2,13% au mois de décembre, pour l'huile essentielle de gingembre. Une augmentation significative de 1,77% à 2,02% est décelée à partir du mois d'octobre au mois de décembre. Des études similaires au présent travail de recherche effectuées à Madagascar révèle que les rendements obtenus en huile essentielle de gingembre varient de 0,77% à 2% [4]. Une étude comparative *in vitro* menée en Algérie donne un rendement en gingembre de 1,47% par hydrodistillation [17].

4.2. Influence de la nouvelle technologie sur les composants en huile essentielle

Le présent travail de recherche indique l'existence des composants chimiques spécifiques à chaque huile essentielle étudiée d'une part, et d'autre part, une teneur élevée de ces chémotypes, à travers le procédé d'extraction par vapo-hydrodistillation de l'huile essentielle.

D'après ce travail de recherche, l'huile essentielle de *ravintsara* est constituée de quatre composants principaux à savoir le 1.8-cinéole (55,97%), le sabinène (14,92%), l' α -terpinéol (8,29%) et l' α -pinène (5,82%). La teneur moyenne en 1.8-cinéole est la plus élevée par rapport aux autres constituants. Les teneurs moyennes de ces différents composants de l'huile essentielle de *ravintsara* varient suivant les périodes de récolte d'après cette recherche. La teneur en 1.8-cinéole augmente de manière significative à partir du mois de septembre jusqu'au mois de décembre, au cours duquel la production d'huile essentielle est maximale. L'analyse en composante principale montre effectivement que le taux de 1.8-cinéole+ s'accroît au cours des saisons humides. Ces résultats d'étude présentent des similarités avec ceux entrepris à Madagascar, évoquant que l'huile essentielle de *ravintsara* se compose majoritairement de produits oxygénés, en l'occurrence de 1.8-cinéole. Les constituants de cette huile essentielle varient, d'après cette étude, en fonction des saisons de production, notamment pour le 1.8-cinéole, qui atteint une teneur maximale au mois de décembre [8].

À propos de l'huile essentielle de niaouli, elle est formée de six composants chimiques majoritaires, comprenant le 1.8-cinéole (39,09%), le Viridiflorol (17,62%), l' α -pinène (8,51%), le limonène (7,40%), l' α -terpinéol (7,07%) et l'(E)-nérolidol (5,94%). Le 1.8-cinéole est considéré comme le constituant majoritaire dans ce type d'huile essentielle. En effet, l'analyse en composante principale confirme que l'huile essentielle de niaouli possède la teneur la plus élevée en 1.8-cinéole. En outre, les variations des teneurs moyennes de chaque composant sont identifiées selon la saison de production d'huile essentielle de niaouli. Les taux moyens en 1,8-cinéole et α -terpinéol s'accroissent au cours des saisons humides, et ceux en viridiflorol, α -pinène, et (E)-nérolidol augmentent durant les saisons relativement sèches. Le taux de limonène reste stable au cours de l'année. Ces informations scientifiques concordent avec les conclusions d'une recherche, stipulant l'existence de 1.8-cinéole (55%) en prépondérance, de viridiflorol et de nérolidol [5].

Pour l'huile essentielle de gingembre, les composants majeurs sont constitués de l' α -zingibérène (32,51%), l'ar-curcumène (8,48%), le camphène (8,23%), le β -phellandène (7,18%) et le β -sesquiphellandène (6,88%). L' α -zingibérène possède la teneur la plus élevée dans la composition chimique de l'huile essentielle de gingembre. L'analyse en composante principale met en évidence l'importance de l' α -zingibérène dans la composition de l'huile essentielle de niaouli. Par ailleurs, la composition en huile essentielle de niaouli contient une corrélation significative en fonction des saisons. En effet, les teneurs moyennes en α -zingibérène et β -sesquiphellandène présentent des pics remarquables pendant les mois de novembre et décembre. Celles de l'ar-curcumène augmentent durant les saisons relativement sèches, pendant les mois d'avril, de juillet, d'août, de

septembre et d'octobre. Le camphène montre des pics remarquables au cours des mois d'avril, d'août et de septembre, et le β -phellandrène pendant les mois d'avril et de septembre. Ces différents résultats présentent des analogies avec ceux de certaines études, indiquant l'influence de la maturité des rhizomes avec la performance au niveau des constituants d'huile essentielle [18].

De ces faits, la nouvelle technologie d'extraction s'associe de manière significative avec la préservation des composants majeurs caractéristiques des huiles essentielle de *ravintsara*, niaouli et de gingembre.

4.3. Influence de la nouvelle technologie d'extraction sur la qualité des huiles essentielles

La qualité des huiles essentielles est basée dans le cadre de cette étude par la détermination de la densité et de l'indice de réfraction, étant donné que les évaluations sensorielles sont toutes positives et en cohérence avec les caractéristiques sensorielles des différentes huiles essentielles. Les résultats obtenus renseignent que la densité moyenne de l'huile essentielle de niaouli (0,919) reste supérieure à celle de l'huile essentielle de *ravintsara* évaluée à (0,911) et l'huile essentielle de gingembre (0,883). En outre, ils révèlent que l'huile essentielle de gingembre comporte un indice de réfraction moyen (1,486) plus élevé par rapport à celui de l'huile essentielle de niaouli (1,470) et de l'huile essentielle de *ravintsara* (1,465).

D'une manière générale, la variabilité qualitative observée dérive de la composition chimique des huiles essentielles étudiées et leur influence directe sur les propriétés physiques. Les différences de composition chimique et plusieurs facteurs biologiques, environnementales et technologiques, expliquent cette diversité qualitative. En effet, les huiles riches en composés légers et volatils, tels que certains monoterpènes hydrocarbonés, présentent généralement une densité plus faible, correspondant à l'huile essentielle de gingembre. Cependant, une teneur plus élevée de composés oxygénés ou à masse moléculaire plus importante accroît la densité, traduisant la valeur plus élevée identifiée pour l'huile essentielle de niaouli. Par ailleurs, l'indice de réfraction possède une dépendance avec la structure moléculaire des composants chimiques. Les huiles essentielles comportant des molécules plus complexes, insaturées ou à forte polarisation électronique, accomplissent une déviation importante de la lumière, pouvant entraîner un indice de réfraction plus élevé. De ce fait, l'indice élevé de l'huile essentielle de gingembre peut s'expliquer par sa richesse en composés fortement réfringents par rapport aux huiles essentielles de niaouli et de *ravintsara*.

La variabilité observée des paramètres physico-chimiques reflète la diversité structurale et fonctionnelle des composés chimiques présents dans chaque huile essentielle, ainsi que l'influence des facteurs biologiques, environnementaux et technologiques sur leur composition. Toutefois, des études sur les huiles essentielles montrent des valeurs de densité et d'indice de réfraction de l'huile essentielle de niaouli [8], de l'huile essentielle de gingembre [19] et de l'huile essentielle de *ravintsara* [14], similaires à la présente recherche.

De ces faits, la nouvelle technologie d'extraction conserve la qualité des huiles essentielles de niaouli, de gingembre et de *ravintsara*.

5. Conclusion

L'utilisation du nouveau système innovant d'extraction d'huile essentielle par le procédé d'hydro-vapo-distillation augmente les rendements en huile essentielle de *ravintsara*, niaouli et gingembre. Elle contribue également à conserver les différents composants chimiques et la qualité de ces différents types d'huile essentielle. Cette recherche concourra à développer la filière huiles essentielles à Madagascar, les conditions socio-économiques des petits producteurs, l'Agriculture durable, l'environnement, la sécurité alimentaire et nutritionnelle, et l'atteinte des objectifs de développement durable à l'horizon 2030 pour Madagascar.

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 Budiyanto, 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.

[18] Baghli F., Z., Iles, M. (2024). Contribution à l'étude de l'activité antioxydante des extraits de *Zingiber officinale*. Université ABOUBEKR BELKAID – TLEMCEN. Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, et Sciences de la Terre et de l'Univers - Département d'Agronomie. MASTER en Sciences Alimentaires - Option : Biologie de la Nutrition, p.68.

[19] Rabehaja, D., J., R. (2013). Production et analyse d'huiles essentielles de plantes aromatiques et médicinales de Madagascar. Caractérisation par rnm 13c, cpg(ir) et cpg-sm ; Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure polytechnique d'Antananarivo, thèse de docteur en chimie, p. 199.