

Article de Revue

Composition physico-chimique et propriétés antimicrobiennes et antioxydantes des huiles essentielles de citronnelle (*Cymbopogon* spp.)

GODSWILL NTSOMBOH NTSEFONG*, MAKONG MADELEINE FLORE, LIKENG-LI-NGUE BENOIT CONSTANT, DZEUFUO TAPINFO CÉLESTINE MÉLANIE ET AMBANG ZACHÉE

Département de Biologie Végétale, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé 1, BP : 812, Yaoundé, Cameroun.

*Auteur Correspondent : ntsomboh@yahoo.fr

Reçu : 27 février 2025, Revu : 04 avril 2025, Révisé : 31 mai 2026, Accepté : 19 août 2026, Publié : 23 septembre 2026

RÉSUMÉ

Cet article propose une synthèse exhaustive de la littérature scientifique sur les huiles essentielles (HE) de citronnelle (*Cymbopogon* spp.), une plante médicinale et aromatique aux applications thérapeutiques et cosmétiques prometteuses. La composition chimique de ces HE se caractérise par une forte variabilité selon l'espèce, l'origine géographique et l'organe végétal, ce qui nécessite une caractérisation chémotypique rigoureuse. Les principaux composés actifs identifiés incluent le citronellal (1,1 % à 45 %), le citronellol (0,2 % à 37,1 %) et le géraniol (2,7 % à 76,6 %). Le *C. citratus* se distingue par une concentration élevée en citral (jusqu'à 90,4 %), tandis que le *C. schoenanthus* présente un profil dominé par le limonène (jusqu'à 27,3 %). Les HE de citronnelle démontrent une activité biocide naturelle significative : une efficacité antibactérienne marquée contre les bactéries Gram-positives (Gram+), avec des Concentrations Minimales Inhibitrices (CMI) atteignant 0,125 mg/mL (notamment sur *Staphylococcus aureus*), tandis que les bactéries Gram-négatives (Gram-) présentent une sensibilité plus modérée, avec des CMI allant de 1,4 à 11,2 mg/mL. Une action fongicide robuste est également observée, particulièrement contre *Candida albicans* et *Aspergillus fumigatus*, avec des zones d'inhibition pouvant atteindre 33,1 mm. En outre, les tests de piégeage des radicaux libres (DPPH) révèlent une activité antioxydante puissante, avec des valeurs d'IC50 généralement comprises entre 50 et 200 µg/mL. La maîtrise des paramètres physico-chimiques, tels qu'une densité moyenne de 0,89 g/mL et une viscosité de 3,8-4,6 cSt, est essentielle pour garantir la qualité, l'authenticité et la reproductibilité des HE dans les formulations industrielles. Cette revue souligne l'importance des méthodes d'extraction optimisées, telles que la distillation assistée par micro-ondes (MAHD), pour maximiser les rendements et préserver la qualité thérapeutique des composés. Enfin, les HE de citronnelle s'imposent comme des alternatives naturelles crédibles aux agents synthétiques dans les secteurs de la dermatologie, de la conservation alimentaire et de la santé humaine, bien que leur intégration industrielle nécessite une démarche scientifique rigoureuse, alliant études cliniques et normalisation internationale.

Mots-clés : *Cymbopogon* spp., Citronnelle, Huiles essentielles, Activité antimicrobienne, Activité antioxydante, Composition physico-chimique, CMI, Citral, Géraniol.

ABSTRACT

This article provides an exhaustive synthesis of existing scientific literature on the essential oils (EOs) of lemongrass (*Cymbopogon* spp.), a medicinal and aromatic plant with promising therapeutic and cosmetic applications. The chemical composition of these EOs is characterized by high variability depending on the species, geographical origin, and plant organ, necessitating rigorous chemotypic characterization. The main active compounds identified include citronellal (1.1% to 45%), citronellol (0.2% to 37.1%), and geraniol (2.7% to 76.6%). *C. citratus* is distinguished by a high concentration of citral (up to 90.4%), while *C. schoenanthus* presents a profile dominated by limonene (up to 27.3%). Lemongrass EOs demonstrate significant natural biocidal activity: a marked antibacterial efficacy against Gram-positive bacteria, with Minimum Inhibitory Concentrations (MIC) reaching 0.125 mg/mL (notably against *Staphylococcus aureus*), while Gram-negative

bacteria show more moderate sensitivity, with MIC values ranging from 1.4 to 11.2 mg/mL. Robust antifungal action is also observed, particularly against *Candida albicans* and *Aspergillus fumigatus*, with inhibition zones reaching up to 33.1 mm. Furthermore, free radical scavenging tests (DPPH) reveal powerful antioxidant activity, with IC₅₀ values generally between 50 and 200 µg/mL. Mastering physical parameters, such as an average density of 0.89 g/mL and a viscosity of 3.8 - 4.6 cSt, is essential to ensure the quality, authenticity, and reproducibility of EOs in industrial formulations. This review highlights the importance of optimized extraction methods, such as microwave-assisted hydrodistillation (MAHD), to maximize yields and preserve the therapeutic quality of the extracted compounds. Finally, lemongrass EOs emerge as credible natural alternatives to synthetic agents in the fields of dermatology, food preservation, and human health, although their industrial integration requires a rigorous scientific approach combining clinical studies and international standardization.

Keywords: *Cymbopogon* spp., Lemongrass, Essential oils, Antimicrobial activity, Antioxidant activity, Physico-chemical composition, MIC, Citral, Geraniol.

1. INTRODUCTION

La citronnelle (*Cymbopogon* spp.), une plante herbacée largement répandue dans les régions tropicales et subtropicales (Bayala *et al.* 2014 & Kiettyka-Dadasiewicz *et al.* 2024), est connue pour ses feuilles longues et étroites, ainsi que pour son odeur caractéristique, due à la présence d'huiles essentielles (Bakkali *et al.* 2008). Elle est utilisée depuis des siècles pour ses propriétés médicinales, culinaires et aromatiques (Kiani *et al.* 2022; Neffati & Sghaier 2014). Dans la médecine traditionnelle, elle est utilisée pour traiter diverses affections, telles que les troubles digestifs, les maux de tête, les rhumatismes et les infections (Ramsey *et al.* 2020; Biabiany *et al.* 2012; Yahi & Chihab 2024). Les feuilles de citronnelle sont également utilisées pour préparer des thés, des infusions et des décoctions, qui sont censés avoir des propriétés médicinales (Kiani *et al.* 2022). En outre, cette plante est utilisée dans la cuisine pour son odeur et son goût caractéristiques, notamment dans les plats asiatiques et africains (Bayala *et al.* 2014 & Kiettyka-Dadasiewicz *et al.* 2024). Dans la médecine moderne, la citronnelle est étudiée pour ses propriétés antimicrobiennes, antioxydantes et anti-inflammatoires (Bakkali *et al.* 2008).

Les huiles essentielles de citronnelle ont des activités antibactériennes, antifongiques et antivirales, ce qui les rend intéressantes pour le développement de nouveaux médicaments (Kiani *et al.* 2022; Boudjadja *et al.* 2012; Kokabi *et al.* 2024). De plus, les composés chimiques présents dans la citronnelle ont été étudiés pour leurs propriétés antioxydantes et anti-inflammatoires, qui pourraient être utiles pour prévenir ou traiter certaines maladies chroniques (Ramsey *et al.* 2020; Boudjadja *et al.* 2012).

Cette revue présente la littérature existante sur la composition physicochimique, les activités antimicrobiennes et antioxydantes, les différentes méthodes d'extraction et d'analyse des huiles essentielles de citronnelle, ainsi que les résultats des études qui ont évalué leurs propriétés médicinales. Elle présente également des perspectives et des orientations futures pour les recherches sur la citronnelle et ses huiles essentielles.

2. MÉTHODES D'EXTRACTION DES HUILES ESSENTIELLES

Les huiles essentielles de *Cymbopogon* spp. sont obtenues à partir de ses feuilles. Les méthodes d'extraction et d'analyse des huiles essentielles sont cruciales pour déterminer leur composition chimique et leurs propriétés physiques. Ces huiles essentielles peuvent être extraites à l'aide de différentes méthodes, notamment la distillation à la vapeur, la pression mécanique et la solvatisation.

La distillation à la vapeur : cette méthode consiste à faire passer de la vapeur d'eau à travers les feuilles de citronnelle pour extraire les huiles essentielles (Bakkali *et al.* 2008). Elle est considérée comme l'une des plus efficaces pour extraire les huiles essentielles de citronnelle (Kiani *et al.* 2022).

La pression mécanique : cette méthode consiste à presser les feuilles de citronnelle pour extraire les huiles essentielles (Bayala *et al.* 2014 & Kiettyka-Dadasiewicz *et al.* 2024). Elle est moins couramment utilisée que la distillation à la vapeur, mais elle peut être efficace pour extraire les huiles essentielles de certaines variétés de citronnelle.

La solvatisation : Cette méthode consiste à utiliser un solvant pour extraire les huiles essentielles des feuilles de citronnelle (Ramsey *et al.* 2020). Elle est moins couramment utilisée que les deux précédentes, car elle peut laisser des résidus de solvant dans les huiles essentielles.

Tableau 1. Analyse et tendances clés des rendements d'extraction des huiles essentielles de *Cymbopogon* spp selon les méthodes:

Méthode d'extraction	Espèce (partie)	Rendement (%)	Pays / Source géographique	Référence
Hydrodistillation (HD)	<i>C. flexuosus</i>	0,86 - 0,89	Tchad	Baou <i>et al.</i> 2022
Hydrodistillation (HD)	<i>C. winterianus</i> (feuilles)	1,5 - 2,2	Népal	Dangol <i>et al.</i> 2023
Hydrodistillation (HD)	<i>C. martini</i> (feuilles)	1,3 - 1,48	Népal	Dangol <i>et al.</i> 2023
Hydrodistillation (HD)	<i>C. schoenanthus</i>	1,1 - 2,6	Tunisie	Khadri <i>et al.</i> 2008
Hydrodistillation (HD)	<i>C. winterianus</i> (racines)	0,3	Népal	Dangol <i>et al.</i> 2023
Hydrodistillation (HD)	<i>C. citratus</i> (racines)	0,5	Népal	Dangol <i>et al.</i> 2023
Hydrodistillation (HD)	<i>C. martini</i> (racines)	0,2	Népal	Dangol <i>et al.</i> 2023
Distillation à la vapeur	<i>C. winterianus</i>	Non spécifié	International	Bakkali <i>et al.</i> 2008
Distillation assistée par micro-ondes (MAHD)	<i>Java lemongrass C. citratus</i>	1,46 ; Geranial (30.06%), Z-Citral (25.88%), Eugenol (12.88%), and Beta-Myrcene (12.84%)	Malaisie & Indonesia	Bhuana <i>et al.</i> 2021 ; Variyana <i>et al.</i> 2023
Extraction par fluide supercritique (SFE)	<i>C. citronella</i>	Non spécifié		Wu <i>et al.</i> 2019
Distillation par entraînement à la vapeur (SDE)	<i>C. citronella</i>	Non spécifié		Wu <i>et al.</i> 2019

L'étude des données du Tableau 1 montre une amplitude importante des rendements, allant de 0,2 % à 2,6 %, avec une valeur moyenne située autour de 1,1 %. Cette disparité repose sur trois leviers principaux :

- **La partie de la plante utilisée** : Il existe une corrélation nette entre l'organe distillé et la richesse en huile essentielle. Les feuilles sont systématiquement plus productives (1,3 à 2,6 %) que les racines, qui présentent des rendements faibles, souvent inférieurs à 0,5 %. Parmi les espèces, *C. winterianus* se distingue par une excellente rentabilité foliaire.

- **L'influence des conditions environnementales** : L'origine géographique joue un rôle déterminant. Les conditions climatiques extrêmes, notamment en milieu désertique (ex. : *C. schoenanthus* en Tunisie), semblent stimuler la production de métabolites secondaires, atteignant le rendement record de 2,6 %.

- **L'optimisation des procédés** : Si l'hydrodistillation (HD) demeure le standard industriel et académique pour son accessibilité, les technologies émergentes comme la distillation assistée par micro-ondes (MAHD) démontrent une supériorité en termes d'efficacité. Cette méthode permet d'obtenir des rendements supérieurs (1,46 %) en des temps plus courts, soulignant une transition vers des procédés d'extraction plus efficaces.

Tableau 2. Synthèse comparative des méthodes d'extraction des huiles essentielles.

Méthode	Efficacité relative	Usage prédominant
Hydrodistillation (HD)	Standard (Base de référence)	Recherche et applications classiques
Micro-ondes (MAHD)	Élevée (Temps réduit)	Optimisation de rendement
Fluide supercritique (SFE)	Très élevée / Sélective	Extraction haute valeur ajoutée

La maximisation du rendement en huile essentielle de *Cymbopogon* ne dépend pas d'un facteur isolé, mais d'une optimisation combinée. Le choix de la partie aérienne (feuilles) constitue le levier le plus accessible pour améliorer le rendement, tandis que l'adoption de technologies d'extraction avancées (MAHD) représente l'avenir pour concilier productivité élevée et préservation des qualités thérapeutiques des composés extraits.

3. MÉTHODES D'ANALYSE DES HUILES ESSENTIELLES

Les huiles essentielles de citronnelle peuvent être analysées à l'aide de différentes méthodes (Tableau 3), notamment :

La chromatographie en phase gazeuse (CPG) : cette méthode consiste à séparer les composés chimiques présents dans les huiles essentielles en fonction de leur point d'ébullition et de leur affinité pour la phase stationnaire (Bakkali *et al.* 2008). La CPG est une méthode couramment utilisée pour analyser les huiles essentielles de citronnelle, car elle permet de séparer et d'identifier les différents composés chimiques présents dans les huiles (Kiani *et al.* 2022).

La spectroscopie infrarouge (IR) : cette méthode consiste à analyser les vibrations moléculaires des composés chimiques présents dans les huiles essentielles (Bayala *et al.* 2014 & Kiełtyka-Dadasiewicz *et al.* 2024). La spectroscopie IR est une méthode non destructive qui permet d'analyser la structure moléculaire des composés chimiques présents dans les huiles essentielles (Ramsey *et al.* 2020).

La spectroscopie de masse (SM) : cette méthode consiste à analyser les fragments moléculaires des composés chimiques présents dans les huiles essentielles (Bakkali *et al.* 2008). La spectroscopie de masse est une méthode sensible et spécifique qui permet d'identifier les différents composés chimiques présents dans les huiles essentielles (Kiani *et al.* 2022).

Tableau 3. Analyse et panorama technique des méthodes d'analyse des huiles essentielles de *Cymbopogon* spp

Méthode d'analyse	Espèce étudiée	Informations obtenues	Pays / Laboratoire	Référence(s)
CPG-SM (GC-MS)	<i>C. winterianus</i> , <i>C. citratus</i> , <i>C. martini</i>	Profil quantitatif et qualitatif ; >20 composés identifiés	Népal	Dangol <i>et al.</i> 2023
CPG-SM-SM (GC-MS-MS)	<i>C. flexuosus</i>	Profil chimique détaillé : citral 38,33%, néral 24,96%	International	Elhrech <i>et al.</i> 2025
CPG-SM (GC-MS)	<i>C. citratus</i>	37 composés ; citral 74,5% (géraniol 44,7% et néral 29,8%)	Malaisie	Piaru <i>et al.</i> 2012
CPG-SM + RMN ¹³ C	<i>C. schoenanthus</i>	Identification structurale et confirmation des composés	Tunisie / Portugal	Khadri <i>et al.</i> 2008
CPG chirale	<i>C. winterianus</i> , <i>C. citratus</i> , <i>C. martini</i>	Distribution énantiomérique de 9 terpènes chiraux	Népal	Dangol <i>et al.</i> 2023
Spectroscopie IR	Générique	Détermination des groupes fonctionnels	International	Bayala <i>et al.</i> 2014 & Kiełtyka-Dadasiewicz <i>et al.</i> 2024
Spectrométrie de masse	Générique	Identification individuelle des molécules	International	Bakkali <i>et al.</i> 2008

L'examen du Tableau 3 confirme la prédominance absolue de la Chromatographie en Phase Gazeuse couplée à la Spectrométrie de Masse (CPG-SM), devenue le standard incontesté grâce à sa capacité à dresser des profils qualitatifs et quantitatifs complets (identification de plus de 20 composés en moyenne par étude).

- **Standardisation :** La CPG-SM est présente dans l'intégralité des études recensées. Elle permet une identification rapide des constituants majoritaires, comme le citral (jusqu'à 74,5 % dans *C. citratus* selon Piaru *et al.* 2012).
- **Haute Précision et Sensibilité :** Pour répondre aux besoins de complexité moléculaire, de nouvelles approches émergent :
 - **CPG-SM-SM (Tandem) :** Elle offre une sensibilité supérieure, cruciale pour détecter et quantifier les composés minoritaires avec précision.
 - **CPG Chirale :** Une avancée majeure qui permet de déterminer la distribution énantiomérique (isomères optiques) de neuf terpènes chiraux, un paramètre essentiel pour garantir la qualité et l'origine des huiles.
 - **RMN ¹³C :** Son couplage avec la CPG-SM permet de lever toute ambiguïté sur la structure chimique, agissant comme une technique de confirmation robuste.

Une analyse des tableaux 3 et 4 montre une transition vers des approches multi-techniques. Pour une caractérisation optimale et rigoureuse des HE de citronnelle, il est désormais recommandé d'adopter une stratégie combinée :

- CPG-SM pour établir le profil chimique de base et la quantification.
- CPG Chirale pour assurer l'authentification et prévenir les falsifications par l'analyse des énantiomères.

Cette approche croisée garantit non seulement une connaissance exhaustive de la composition, mais assure également la traçabilité et la qualité thérapeutique du produit fini.

Tableau 4. Récapitulatif des capacités analytiques

Méthode	Objectif principal	Avantage clé
CPG-SM	Profilage global	Standard industriel ; efficacité quantitative
CPG-SM-SM	Détection de traces	Très haute sensibilité pour les composés minoritaires
CPG Chirale	Authentification	Analyse de la pureté énantiomérique
RMN ¹³ C	Confirmation structurale	Identification sans ambiguïté des molécules
Spectroscopie IR	Identification fonctionnelle	Détection rapide des groupements chimiques

4. COMPOSITION CHIMIQUE DES HUILES ESSENTIELLES DE CITRONNELLE

4.1. Variabilité de composés chimiques

Les huiles essentielles de citronnelle contiennent une variété de composés chimiques (Tableau V), notamment :

- **Hydrocarbures monoterpéniques** : Ces composés sont présents en grande quantité dans les huiles essentielles de citronnelle, incluant le citronellal, le citronellol et le géraniol (Bakkali *et al.* 2008). Ils sont responsables de l'odeur et du goût caractéristiques de la citronnelle (Kiani *et al.* 2022). Selon Mekhloufi et Hadroug (2024), ces hydrocarbures jouent un rôle important dans les propriétés aromatiques de la plante.
- **Hydrocarbures sesquiterpéniques** : Présents en moindre quantité, ces composés, tels que le β -caryophyllène et le β -selinène, ont été montrés pour avoir des propriétés anti-inflammatoires et antioxydantes (Bayala *et al.* 2014 & Kiettyka-Dadasiewicz *et al.* 2024; Ramsey *et al.* 2020). Comme le souligne Sabrina (2022), leur présence contribue à l'efficacité des huiles essentielles dans les applications thérapeutiques.
- **Composés oxygénés** : Incluant des alcools, des aldéhydes et des esters, ces composés sont également présents en moindre quantité et ont montré des propriétés antimicrobiennes et antifongiques (Bakkali *et al.* 2008; Kiani *et al.* 2022). Boukhatem, Ferhat et Kameli (2019) discutent des méthodes d'extraction qui influencent ces composés, tandis qu'Aribi-Zouiouche et Couic-Marinier (2021) mettent en avant leur importance dans la chiralité moléculaire.

L'analyse du Tableau 5 met en évidence la complexité chimique du genre *Cymbopogon*. La composition en huiles essentielles (HE) ne constitue pas une donnée figée, mais un profil dynamique influencé par l'espèce, l'organe végétal et les conditions environnementales.

4.2. Tendances dominantes des profils chimiques

La variabilité observée (Tableau 5) est marquée par des écarts importants, illustrant l'importance du concept de chémotype pour la valorisation thérapeutique.

- **Diversité interspécifique** : Les profils métaboliques sont distincts selon l'espèce. Le *C. citratus* se caractérise par une prédominance de monoterpènes oxygénés (Citral, Géraniol), tandis que le *C. schoenanthus* exprime un profil dominé par des terpènes hydrocarbonés comme le limonène (jusqu'à 27,3 %).
- **Différenciation organo-spécifique** : La répartition des molécules actives varie selon la partie de la plante récoltée. À titre d'exemple, les racines de *C. citratus* présentent une concentration en géraniol plus élevée (87,9 %) que les feuilles (76,6 %), soulignant la nécessité d'une sélection rigoureuse de la biomasse en fonction de l'usage visé.
- **Impact des procédés sur la qualité** : La méthode d'extraction n'influence pas seulement le rendement, mais aussi la pureté chimique. Les technologies émergentes comme la MAHD (distillation assistée par micro-ondes) favorisent une meilleure conservation ou récupération des composés thermolabiles, comme en témoigne la teneur plus élevée en citral (86,48 %) par rapport à l'hydrodistillation conventionnelle.

Tableau 5 : Principaux composés chimiques identifiés dans les huiles essentielles de *Cymbopogon* spp

Composé chimique	Espèce / Partie	Fourchette (%)	Moyenne (%)	Méthode	Référence(s)
Citral (géraniol + néral)	<i>C. flexuosus</i>	63,29 (38,33 + 24,96)	63,3	CPG-SM	Elhrech <i>et al.</i> 2025
Citral	<i>C. citratus</i> (feuilles)	65 - 90,4	78	CPG-SM	Dangol <i>et al.</i> 2023
Géraniol	<i>C. citratus</i> (feuilles)	74,5	74,5	CPG-SM	Piaru <i>et al.</i> 2012
Néral	<i>C. citratus</i> (feuilles)	29,8	29,8	CPG-SM	Piaru <i>et al.</i> 2012
Géraniol	<i>C. citratus</i> (feuilles)	76,6	76,6	CPG-SM	Dangol <i>et al.</i> 2023
Géraniol	<i>C. citratus</i> (racines)	87,9	87,9	CPG-SM	Dangol <i>et al.</i> 2023
Géraniol	<i>C. winterianus</i> (feuilles)	37,1	37,1	CPG-SM	Dangol <i>et al.</i> 2023
Citronellal	<i>C. winterianus</i> (feuilles)	8,6 - 13,7	11,2	CPG-SM	Dangol <i>et al.</i> 2023
Citronellol	<i>C. winterianus</i> (feuilles)	4,3 - 7,5	5,9	CPG-SM	Dangol <i>et al.</i> 2023
α -Élémol	<i>C. winterianus</i> (racines)	29,5 - 53,1	41,3	CPG-SM	Dangol <i>et al.</i> 2023
Acétate de géranyle	<i>C. citratus</i> (feuilles)	15,2	15,2	CPG-SM	Dangol <i>et al.</i> 2023
Limonène	<i>C. schoenanthus</i>	10,5 - 27,3	18,9	CPG-SM / RMN	Khadri <i>et al.</i> 2008
β -Phellandrène	<i>C. schoenanthus</i>	8,2 - 16,3	12,2	CPG-SM / RMN	Khadri <i>et al.</i> 2008
δ -Terpinène	<i>C. schoenanthus</i>	4,3 - 21,2	12,8	CPG-SM / RMN	Khadri <i>et al.</i> 2008

Tableau 6. Récapitulatif des chémotypes majeurs

Composé dominant	Espèce représentative	Concentration maximale
Citral	<i>C. citratus</i>	90,4 %
Géraniol	<i>C. citratus</i> (racines)	87,9 %
Citronellal	<i>C. winterianus</i>	13,7 %
Limonène	<i>C. schoenanthus</i>	27,3 %

Cette variabilité chimique (Tableau 6), corrélée aux conditions géographiques et climatiques, explique pourquoi les propriétés pharmacologiques des huiles essentielles de *Cymbopogon* peuvent fluctuer. Pour garantir une efficacité constante en contexte thérapeutique, il est important de prendre en compte deux impératifs :

- **La caractérisation chémotypique** : Identifier précisément le profil chimique majoritaire de chaque lot avant toute application.
- **La standardisation** : Établir des normes de récolte et d'extraction pour minimiser les variations intra-spécifiques.

La maîtrise de ces paramètres est indispensable pour transformer une ressource naturelle variable en un agent thérapeutique fiable, reproductible et sécurisé.

5. PROPRIETES PHYSIQUES DES HUILES ESSENTIELLES DE CITRONNELLE

5.1. Propriétés physiques caractéristiques

Les huiles essentielles de citronnelle présentent des propriétés physiques caractéristiques, notamment :

- **Densité** : Avec une densité comprise entre 0,85 et 0,95 g/cm³, elles sont similaires à celles d'autres huiles essentielles de plantes aromatiques (Bakkali *et al.* 2008, Kiani *et al.* 2022). Djarallah et Bensaci (2020) soulignent l'importance de cette caractéristique dans les applications industrielles.

- **Viscosité** : La viscosité des huiles essentielles de citronnelle se situe entre 1 et 5 mm²/s, ce qui facilite leur utilisation dans les applications cosmétiques et pharmaceutiques (Bayala *et al.* 2014 & Kiettyka-Dadasiewicz *et al.* 2024; Ramsey *et al.* 2020).
- **Point d'ébullition** : Ces huiles ont un point d'ébullition compris entre 170 et 200 °C, indiquant leur stabilité à haute température (Bakkali *et al.* 2008, Kiani *et al.* 2022). Djerbal (2023) mentionne que cette caractéristique est cruciale pour leur utilisation dans diverses formulations.

Les huiles essentielles de citronnelle sont donc des mélanges complexes de composés chimiques présentant des propriétés physiques et chimiques distinctes. Leur composition peut varier en fonction de la méthode d'extraction et de la qualité de la plante utilisée (Singh *et al.* 2011).

Le Tableau 7 présente les caractéristiques physico-chimiques fondamentales des huiles essentielles (HE) du genre *Cymbopogon*. Ces paramètres constituent les "empreintes digitales" physiques du produit, essentielles pour garantir sa conformité, sa pureté et son intégration réussie dans des formulations industrielles.

Tableau 7 : Propriétés physico-chimiques des huiles essentielles de *Cymbopogon* spp

Propriété	Valeur typique	Espèce concernée	Application / Importance	Référence(s)
Densité (25 °C)	0,897 - 0,899 g/mL	<i>C. winterianus</i> , <i>C. flexuosus</i>	Formulation industrielle	Kumoro <i>et al.</i> 2021
Densité	0,85 - 0,95 g/cm ³	Générique	Formulation	Bakkali <i>et al.</i> 2008 ; Kiani <i>et al.</i> 2022
Viscosité cinématique	3,8 - 4,6 cSt	<i>C. winterianus</i> , <i>C. flexuosus</i>	Cosmétique	Kumoro <i>et al.</i> 2021
Viscosité	1 - 5 mm ² /s	Générique	Cosmétique	Bayala <i>et al.</i> 2014 & Kiettyka-Dadasiewicz <i>et al.</i> 2024 ; Ramsey <i>et al.</i> 2020
Point d'ébullition	221 - 224 °C	<i>C. winterianus</i> , <i>C. flexuosus</i>	Stabilité thermique	Kumoro <i>et al.</i> 2021
Point d'ébullition	170 - 200 °C	Générique	Stabilité thermique	Bakkali <i>et al.</i> 2008 ; Djerbal 2023
Point d'éclair	55 - 69 °C	<i>C. winterianus</i> , <i>C. flexuosus</i>	Sécurité	Kumoro <i>et al.</i> 2021
Indice de réfraction (n _{20/D})	1,471	<i>C. winterianus</i>	Contrôle qualité	Dangol <i>et al.</i> 2023
Couleur	Jaune pâle à jaune	Toutes espèces	Acceptabilité	Dangol <i>et al.</i> 2023

5.2. Analyse des propriétés physiques constantes et applications

Les propriétés mesurées montrent une cohérence notable à travers la littérature, ce qui facilite leur utilisation comme critères de contrôle qualité.

- **Densité et Viscosité** : Avec une densité moyenne avoisinant **0,89 g/mL** et une viscosité très faible (**3,8 - 4,6 cSt**), les HE de citronnelle présentent une fluidité optimale. Cette caractéristique est un atout majeur pour les industries cosmétiques et pharmaceutiques, car elle permet une incorporation facile dans les émulsions, les lotions et les formulations topiques sans altérer la texture des produits finis.
- **Stabilité Thermique (Point d'ébullition)** : Les données expérimentales situent le point d'ébullition autour de **222 °C**. Cette stabilité thermique relative est cruciale, non seulement pour le stockage, mais également pour la maîtrise des procédés de transformation industrielle comme la rectification ou la distillation fractionnée.
- **Sécurité et Contrôle (Point d'éclair et Indice de réfraction)** : Le point d'éclair, compris entre **55 et 69 °C**, est un indicateur de sécurité critique pour la manipulation, le transport et le stockage en milieu industriel. Parallèlement, l'indice de réfraction (ex. : 1,471 pour *C. winterianus*) sert d'outil de routine pour vérifier rapidement la pureté d'un lot par rapport aux standards établis.

La stabilité de ces propriétés physiques (Tableau 8), malgré la variabilité de la composition chimique détaillée précédemment, souligne la robustesse des huiles essentielles de *Cymbopogon*. Pour les industriels, ces données ne sont pas seulement informatives : elles sont opérationnelles. La maîtrise de ces constantes physiques permet de :

Tableau 8. Récapitulatif des paramètres de contrôle

Paramètre physique	Valeur typique	Usage industriel
Densité	0,85 - 0,95 g/cm ³	Standardisation des mélanges
Viscosité	1 - 5 mm ² /s	Formulation cosmétique
Point d'ébullition	170 - 224 °C	Gestion de la stabilité thermique
Point d'éclair	55 - 69 °C	Protocole de sécurité incendie

- **Valider l'authenticité** : Une déviation significative des valeurs (ex. : densité ou indice de réfraction) est souvent le premier signe d'une adultération ou d'une dégradation de l'huile.
- **Optimiser le design de formulation** : La faible viscosité permet une biodisponibilité accrue et une meilleure pénétration cutanée dans les produits dermatologiques.

En somme, ces paramètres assurent la transition entre l'analyse de laboratoire et l'application commerciale, garantissant un produit stable, sécurisé et reproductible.

6. MÉTHODES D'ÉVALUATION, ACTIVITÉS ANTIMICROBIENNES ET ANTIOXYDANTES DES HUILES ESSENTIELLES DE CITRONNELLE

Les huiles essentielles de citronnelle sont connues pour leurs propriétés antimicrobiennes, qui leur permettent de lutter contre les micro-organismes tels que les bactéries, les champignons et les virus. Dans cette partie, nous allons présenter les méthodes d'évaluation de l'activité antimicrobienne des huiles essentielles de citronnelle, ainsi que les résultats des études qui ont évalué leur activité antibactérienne, antifongique et antivirale.

6.1. Méthodes d'évaluation de l'activité antimicrobienne

Les méthodes d'évaluation de l'activité antimicrobienne des huiles essentielles de citronnelle peuvent varier en fonction du type de micro-organisme étudié (Bakkali *et al.* 2008). Voici quelques-unes des méthodes les plus couramment utilisées :

- **La méthode de diffusion en gélose** : cette méthode consiste à placer une goutte d'huile essentielle sur une gélose contenant les micro-organismes à étudier (Bayala *et al.* 2014 & Kiettyka-Dadasiewicz *et al.* 2024). La zone d'inhibition de la croissance microbienne est ensuite mesurée (Kiani *et al.* 2022).
- **La méthode de dilution en série** : cette méthode consiste à diluer l'huile essentielle dans un milieu de culture et à évaluer la croissance microbienne en fonction de la concentration d'huile essentielle (Bakkali *et al.* 2008).
- **La méthode de microdilution** : cette méthode consiste à utiliser des plaques de microdilution pour évaluer la croissance microbienne en fonction de la concentration d'huile essentielle (Ramsey *et al.* 2020).

6.2. Activités antimicrobiennes

6.2.1 Activité antibactérienne des huiles essentielles de citronnelle

Les huiles essentielles de citronnelle ont été étudiées pour leur activité antibactérienne contre diverses bactéries, notamment *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* et *Pseudomonas aeruginosa* (Bayala *et al.* 2014 & Kiettyka-Dadasiewicz *et al.* 2024). Les résultats des études ont montré que les huiles essentielles de citronnelle possèdent une activité antibactérienne significative, avec des zones d'inhibition de la croissance microbienne comprises entre 10 et 30 mm (Kiani *et al.* 2022). Ces résultats sont conformes à ceux d'autres études qui ont également montré l'efficacité des huiles essentielles de citronnelle contre diverses bactéries (Bakkali *et al.* 2008). Les composés chimiques présents dans les huiles essentielles de citronnelle, tels que le citronellal et le géraniol, ont été identifiés comme étant responsables de leur activité antibactérienne (Ramsey *et al.* 2020).

6.2.2. Activité antifongique des huiles essentielles de citronnelle

Les huiles essentielles de citronnelle ont également été étudiées pour leur activité antifongique contre diverses espèces de champignons, notamment *Candida albicans* et *Aspergillus niger* (Bayala *et al.* 2014 & Kiettyka-Dadasiewicz *et al.* 2024). Les résultats des études ont montré que les huiles essentielles de citronnelle possèdent une activité antifongique significative, avec des zones d'inhibition de la croissance microbienne comprises entre 10 et 25 mm (Kiani *et al.* 2022). Ces résultats sont conformes à ceux d'autres études qui ont également montré

l'efficacité des huiles essentielles de citronnelle contre diverses espèces de champignons (Bakkali *et al.* 2008). Les composés chimiques présents dans les huiles essentielles de citronnelle, tels que le citronellal et le géraniol, ont été identifiés comme étant responsables de leur activité antifongique (Ramsey *et al.* 2020). Les huiles essentielles de citronnelle pourraient donc être utilisées comme agent antifongique naturel pour prévenir ou traiter les infections fongiques (Bayala *et al.* 2014 & Kiettyka-Dadasiewicz *et al.* 2024). Cependant, des études supplémentaires sont nécessaires pour confirmer l'efficacité et la sécurité des huiles essentielles de citronnelle pour cette utilisation (Kiani *et al.* 2022).

6.2.3. Activité antivirale des huiles essentielles de citronnelle

Les huiles essentielles de citronnelle ont également été étudiées pour leur activité antivirale contre diverses espèces de virus, notamment le virus de l'herpès simplex et le virus de la grippe (Kiani *et al.* 2022). Les résultats des études ont montré que les huiles essentielles de citronnelle possèdent une activité antivirale significative, avec une réduction de la charge virale comprise entre 50 et 90% (Bayala *et al.* 2014 & Kiettyka-Dadasiewicz *et al.* 2024).

6.2.4. Analyse de l'efficacité antimicrobienne

Le tableau 9 présente les propriétés antimicrobiennes des huiles essentielles (HE) du genre *Cymbopogon*. Les données démontrent un spectre d'action large, confirmant le potentiel de ces extraits comme agents biocides naturels face à une vaste gamme de pathogènes.

Tableau 9. Quelques études sur les activités antimicrobiennes des huiles essentielles de *Cymbopogon* spp

Microorganisme	Type d'activité	CMI (mg/mL)	Zone d'inhibition (mm)	Référence(s)
<i>Staphylococcus aureus</i> (Gram+)	Bactéricide	0,125 - 5,6	14,2 - 22,2	Xiao <i>et al.</i> 2020 ; Wu <i>et al.</i> 2019
<i>Staphylococcus epidermidis</i>	Bactéricide	Non spécifié	Active	Dangol <i>et al.</i> 2023
<i>Streptococcus pyogenes</i>	Bactéricide	Non spécifié	Active	Dangol <i>et al.</i> 2023
<i>Escherichia coli</i> (Gram-)	Bactéricide	1,4 - 11,2	18,7 - 25,2	Wu <i>et al.</i> 2019
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Bactériostatique	1,2 - 2,5	Non spécifié	Kiani <i>et al.</i> 2022
<i>Candida albicans</i> (levure)	Fongicide	1,4 - 5,6	14,1 - 23,1	Wu <i>et al.</i> 2019 Dangol <i>et al.</i> 2023
<i>Aspergillus niger</i> (moisissure)	Fongistatique	1,4 - 2,8	23,1	Wu <i>et al.</i> 2019
<i>Aspergillus fumigatus</i>	Fongicide	2,8 - 11,2	14,6 - 33,1	Wu <i>et al.</i> 2019
<i>Microsporum canis</i> (dermatophyte)	Fongicide	Non spécifié	Active	Dangol <i>et al.</i> 2023
<i>Trichophyton mentagrophytes</i> (dermatophyte)	Fongicide	Non spécifié	Active	Dangol <i>et al.</i> 2023

Le tableau 9 illustre que l'efficacité des HE de citronnelle repose sur leur capacité à perturber l'intégrité cellulaire des microorganismes, avec une sensibilité qui varie selon la structure de la cible.

- **Spectre bactéricide** : Les bactéries Gram-positives, telles que *Staphylococcus aureus*, présentent une sensibilité élevée avec des Concentrations Minimales Inhibitrices (CMI) pouvant descendre jusqu'à 0,125 mg/mL. À l'inverse, les bactéries Gram-négatives (*Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*) sont généralement plus résistantes, ce qui s'explique par la barrière protectrice de leur membrane externe, nécessitant des doses plus importantes pour une inhibition complète.
- **Performance antifongique** : L'activité contre les levures et les moisissures est particulièrement marquante. L'inhibition de *Candida albicans* et *Aspergillus fumigatus* (avec des zones d'inhibition atteignant 33,1 mm) positionne les HE de *Cymbopogon* comme des candidats sérieux pour le traitement des mycoses.

- **Efficacité sur les dermatophytes** : L'action démontrée contre *Microsporum canis* et *Trichophyton mentagrophytes* ouvre des perspectives thérapeutiques directes pour les infections fongiques cutanées.

Tableau 10. Récapitulatif de la sensibilité des microorganismes

Cible microbienne	Type d'activité	CMI (mg/mL)	Efficacité relative
Bactéries Gram+	Bactéricide	0,125 - 5,6	Très haute
Bactéries Gram-	Bactériostatique/Bactéricide	1,2 - 11,2	Modérée
Levures	Fongicide	1,4 - 5,6	Haute
Moisissures	Fongistatique/Fongicide	1,4 - 11,2	Haute

De ce qui précède (Tableaux 9 et 10), il ressort que l'activité antimicrobienne des HE de citronnelle est fortement corrélée aux méthodes d'extraction. Il a été observé que des techniques comme l'extraction par fluide supercritique (SFE) favorisent une meilleure conservation des composés actifs, résultant en des zones d'inhibition supérieures à celles obtenues par distillation conventionnelle.

La synthèse de ces données permet de conclure que :

- **Potentiel de substitution** : Les HE de *Cymbopogon* représentent une alternative naturelle crédible aux antifongiques synthétiques, souvent limités par la toxicité ou l'émergence de résistances.
- **Stratégie clinique** : La faible CMI sur les pathogènes cutanés et invasifs (*A. fumigatus*) soutient l'idée d'une utilisation ciblée en dermatologie et en milieu hospitalier pour la désinfection.

La standardisation des chémotypes, associée à des méthodes d'extraction optimisées, est désormais la clé pour garantir l'efficacité clinique de ces agents naturels.

En résumé, les huiles essentielles de citronnelle possèdent des activités antimicrobiennes significatives contre les bactéries, les champignons et les virus (Bakkali *et al.* 2008). Ces résultats suggèrent que les huiles essentielles de citronnelle pourraient être utilisées comme agents antimicrobiens naturels pour prévenir ou traiter les infections (Kiani *et al.* 2022). Cependant, des études supplémentaires sont nécessaires pour confirmer l'efficacité et la sécurité des huiles essentielles de citronnelle pour cette utilisation (Ramsey *et al.* 2020).

6.3. Activités antioxydantes des huiles essentielles de citronnelle

Les huiles essentielles de citronnelle sont connues pour leurs propriétés antioxydantes, qui leur permettent de protéger les cellules contre les dommages causés par les radicaux libres (Bakkali *et al.* 2008). Dans cette partie, nous allons présenter les méthodes d'évaluation de l'activité antioxydante des huiles essentielles de citronnelle, ainsi que les résultats des études qui ont évalué leur activité antioxydante. Les méthodes d'évaluation de l'activité antioxydante des huiles essentielles de citronnelle incluent notamment la méthode de piégeage des radicaux libres DPPH (2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl), la méthode de réduction du fer (FRAP) (Bayala *et al.* 2014 & Kiełtyka-Dadasiewicz *et al.* 2024) et la méthode de mesure de l'activité antioxydante par la technique de la résonance paramagnétique électronique (EPR) (Ramsey *et al.* 2020). Les résultats des études ont montré que les huiles essentielles de citronnelle possèdent une activité antioxydante significative (Kiani *et al.* 2022), avec une capacité à piéger les radicaux libres DPPH comprise entre 50 et 90%. Les composés chimiques présents dans les huiles essentielles de citronnelle, tels que le citronellal et le géraniol, ont été identifiés comme étant responsables de leur activité antioxydante (Bakkali *et al.* 2008).

6.3.1. Méthodes d'évaluation de l'activité antioxydante

Les méthodes d'évaluation de l'activité antioxydante des huiles essentielles de citronnelle peuvent varier en fonction du type de radicaux libres étudiés (Bakkali *et al.*, 2008). Voici quelques-unes des méthodes les plus couramment utilisées :

La méthode de piégeage des radicaux libres DPPH (2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl) : cette méthode consiste à mesurer la capacité de l'huile essentielle à piéger les radicaux libres DPPH (Kiani *et al.* 2022). Cette méthode est largement utilisée pour évaluer l'activité antioxydante des huiles essentielles (Bayala *et al.* 2014 & Kiełtyka-Dadasiewicz *et al.* 2024).

La méthode de piégeage des radicaux libres ABTS (2,2'-azino-bis(3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonique)) : cette méthode consiste à mesurer la capacité de l'huile essentielle à piéger les radicaux libres ABTS (Lourenço

et al. 2019). Cette méthode est également utilisée pour évaluer l'activité antioxydante des huiles essentielles (Castilho et al. 2012).

La méthode de mesure de l'activité antioxydante par l'oxydation des lipides : cette méthode consiste à mesurer la capacité de l'huile essentielle à inhiber l'oxydation des lipides. Cette méthode est utilisée pour évaluer l'activité antioxydante des huiles essentielles dans les systèmes biologiques (Rhim et al. 2022 & Laguerre et al. 2007).

Les études démontrent que les huiles essentielles de citronnelle possèdent une activité antioxydante significative (Tableau 11), leur permettant de protéger les cellules contre les dommages induits par les radicaux libres (Bakkali et al. 2008). Cette capacité, illustrée par une efficacité de piégeage des radicaux libres DPPH et ABTS variant entre 50 et 90 %, confirme leur potentiel en tant qu'agents antioxydants naturels pour la prévention ou le traitement de maladies liées au stress oxydatif (Kiani et al. 2022).

Cette activité biologique est principalement attribuée à la présence de composés chimiques tels que le citronellal, le citronellol et le géraniol (Bakkali et al. 2008 ; Bayala et al. 2014 & Kiettyka-Dadasiewicz et al. 2024). Il a été démontré que ces molécules spécifiques possèdent des propriétés marquées pour piéger les radicaux libres et inhiber l'oxydation des lipides (Lourenço et al. 2019).

Tableau 11. Quelques études sur les activités antioxydantes des huiles essentielles et extraits de *Cymbopogon* spp

Méthode	Espèce / Composé	IC ₅₀ / Résultat	Comparaison / Standard	Référence(s)
DPPH	<i>C. flexuosus</i>	63,63 µg/mL	Activité puissante	Elhrech et al. 2025
DPPH	<i>C. schoenanthus</i> (feuilles fraîches - désert)	IC ₅₀ = 0,47 mg/mL	Meilleure activité	Khadri et al. 2008
DPPH	<i>C. schoenanthus</i> (général)	36,0 - 73,8 % à 2 µL/mL	Dépend du site de récolte	Khadri et al. 2008
DPPH	Générique	50 - 200 µg/mL	Activité modérée à élevée	Kiani et al. 2022 ; Wang et al. 2022
ABTS	<i>C. flexuosus</i>	95,99 µg/mL	Comparable au DPPH	Elhrech et al. 2025
ABTS	Générique	40 - 150 µg/mL ; 1,70 - 2,15 mol Trolox/mol	Bon pouvoir piégeur de radicaux	Wang et al. 2022 ; Lourenço et al. 2019
FRAP	<i>C. flexuosus</i>	84,64 µg/mL	Bonne capacité réductrice	Elhrech et al. 2025
FRAP	Générique	1,31 - 2,42 mol Trolox/mol	Capacité réductrice élevée	Wang et al. 2022
β-carotène-acide linoléique	<i>C. schoenanthus</i>	IC ₅₀ = 0,47 ± 0,04 mg/mL	Protection contre la peroxydation lipidique	Khadri et al. 2008
Inhibition de la tyrosinase (dermoprotection)	<i>C. flexuosus</i>	IC ₅₀ = 114,76 µg/mL	Meilleure que la quercétine (242,99 µg/mL)	Elhrech et al. 2025

Cette synthèse (Tableau 11) examine les capacités antioxydantes des huiles essentielles (HE) de *Cymbopogon*. Les données confirment que ces extraits ne sont pas seulement des agents antimicrobiens, mais possèdent également un potentiel significatif pour neutraliser le stress oxydatif, un processus impliqué dans le vieillissement cellulaire et diverses pathologies.

6.3.2. Analyse de l'efficacité antioxydante (C₅₀ = 114,76 µg/mL).

Cette efficacité supérieure à celle de la quercétine (un antioxydant de référence) souligne l'intérêt de ces huiles pour des formulations éclaircissantes ou anti-âge.

Tableau 12. Récapitulatif de l'activité antioxydante

Méthode d'évaluation	Indicateur clé	Efficacité observée
DPPH	IC ₅₀ (piégeage radical)	63,6 - 470 µg/mL
ABTS	Pouvoir piégeur	Élevé (1,70 - 2,15 mol Trolox/mol)
FRAP	Capacité réductrice	Élevée (1,31 - 2,42 mol Trolox/mol)
Inhibition Tyrosinase	IC ₅₀ (antitaches)	114,76 µg/mL

6.3.3. Conclusion et portée stratégique de l'évaluation de l'activité antioxydante

La variabilité de l'activité antioxydante observée, notamment entre les populations de *C. schoenanthus* (climat désertique vs montagneux), confirme que l'environnement de culture constitue un levier majeur de qualité. Les plantes soumises à des stress climatiques extrêmes produisent des profils chimiques plus riches en antioxydants. Cette spécificité permet d'envisager trois axes de valorisation :

- **Industrie agroalimentaire** : Utilisation comme conservateur naturel pour prévenir la peroxydation lipidique des produits manufacturés.
- **Industrie cosmétique** : Intégration comme actif anti-vieillessement et régulateur de la mélanogenèse par l'inhibition de la tyrosinase.
- **Santé humaine** : Développement de compléments naturels visant à réduire le stress oxydatif systémique.

La standardisation des extraits, fondée sur le chémotype (citral, géraniol, etc.), demeure la condition *sine qua non* pour garantir ces bienfaits dans des produits finis fiables.

7. PERSPECTIVES ET ORIENTATIONS FUTURES

Bien que les huiles essentielles (HE) de citronnelle présentent des propriétés thérapeutiques prometteuses, leur exploitation optimale reste à parfaire (Bakkali *et al.* 2008).

Axes de recherche prioritaires

Les recherches futures doivent se focaliser sur :

- **La caractérisation moléculaire** : Poursuivre l'étude de la composition chimique pour corrélérer précisément les molécules (citronellal, citronellol, géraniol) aux activités observées (Kiani *et al.* 2022 ; Bayala *et al.* 2014 & Kiettyka-Dadasiewicz *et al.* 2024).
- **Les mécanismes biologiques** : Approfondir l'analyse des interactions entre les composants des HE et les systèmes biologiques, ainsi que les mécanismes d'inhibition microbienne et de protection cellulaire (Lourenço *et al.* 2019 ; Bakkali *et al.* 2008).
- **La sécurité toxicologique** : Évaluer rigoureusement la toxicité à long terme pour définir des seuils d'utilisation sûrs, évitant les risques liés à une administration prolongée ou à haute dose (Kiani *et al.* 2022 ; Bakkali *et al.* 2008).

Domaines d'application potentiels

Les HE de citronnelle offrent des perspectives vastes allant au-delà de l'aromathérapie traditionnelle :

- **Pharmacie** : Développement d'agents antimicrobiens et anti-inflammatoires pour traiter les troubles digestifs et les infections (Bayala *et al.* 2014 & Kiettyka-Dadasiewicz *et al.* 2024 ; Kiani *et al.* 2022).
- **Cosmétique** : Protection cutanée et capillaire contre les radicaux libres (Lourenço *et al.* 2019 ; Bakkali *et al.* 2008).
- **Agriculture** : Élaboration de biopesticides et fongicides naturels pour la protection des cultures (Purkait *et al.* 2019 ; Koul *et al.* 2008).

Défis et limites actuelles

Le passage à une utilisation industrielle et clinique généralisée se heurte toutefois à trois obstacles majeurs :

- **Qualité et standardisation** : La nécessité d'harmoniser les méthodes d'extraction et de purification pour prévenir les adultérations ou contaminations (Bakkali *et al.* 2008 ; Kiani *et al.* 2022).
- **Cadre réglementaire** : Le respect des directives édictées par des organismes tels que l'OMS et l'EMA est indispensable pour valider la sécurité des produits (Lourenço *et al.* 2019 ; Ramsey *et al.* 2020).
- **Accessibilité** : Garantir un accès équitable aux ressources, souvent freiné par des coûts de production élevés ou une disponibilité géographique inégale des matières premières (Bayala *et al.* 2014 & Kiettyka-Dadasiewicz *et al.* 2024 ; Kiani *et al.* 2022).

En somme, si les HE de citronnelle possèdent un potentiel thérapeutique majeur, leur intégration dans la pharmacopée moderne nécessite une démarche scientifique rigoureuse, alliant études cliniques et normalisation internationale (Bakkali *et al.* 2008).

REFERENCES

- Aribi-Zouiouche, L., & Couic-Marinier, F. (2021). Huiles essentielles et chiralité moléculaire. *Comptes Rendus. Chimie*, 24(3), 397-414. <https://doi.org/10.5802/crchim.130>
- Bakkali, F., Averbeck, S., Averbeck, D., & Idaomar, M. (2008). Biological effects of essential oils - A review. *Food and Chemical Toxicology*, 46(2), 446-475. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2007.09.106>
- Baou, A., Bassiloua, J.B., Silou, T., Douguirgue, E., Kedou, K., & Kalulu, T. (2022). Kinetic modeling of Essential oil extraction from lemongrass acclimatized in Tandjilé in Chad. *Asian Journal of Research in Chemistry*, 15(3). <https://doi.org/10.52711/0974-4150.2022.00041>
- Bayala, B., Bassole, I. H. N., Gnoula, C., Nebie, R., Yonli, A., Morel, L., ... & Simpore, J. (2014). Chemical composition, antioxidant, anti-inflammatory and anti-proliferative activities of essential oils of plants from Burkina Faso. *PLoS one*, 9(3), e92122. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0092122>
- Bhuana, D. S., Ma'sum, Z., & Mahfud, M. (2021, September). Optimization of extraction of lemongrass leaves (*Cymbopogon citratus*) with microwave-assisted hydrodistillation using Box-Behnken design. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2370, No. 1, p. 080005). AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/5.0062180>
- Biabiany, M., Joseph, H., & Bourgeois, P. (2012). Les épices, plantes à flaveur et médicinales: exemples de quelques espèces aromatiques de Guadeloupe. *Phytothérapie*, 10(2), 92-99. <https://doi.org/10.1007/s10298-012-0692-3>
- Boudjadja, W., Bouzerzara, S., & Bekka, F. E. (2012). Activité antivirale des huiles essentielles: cas des picornavirus (Doctoral dissertation, Université de Jijel).
- Boukhatem, M. N., Ferhat, A., & Kameli, A. (2019). Méthodes d'extraction et de distillation des huiles essentielles: revue de littérature. *Une*, 3(4), 1653-1659. <https://asjp.cerist.dz/en/article/120330>
- Castilho, P. C., Savluchinske-Feio, S., Weinhold, T. S., & Gouveia, S. C. (2012). Evaluation of the antimicrobial and antioxidant activities of essential oils, extracts and their main components from oregano from Madeira Island, Portugal. *Food Control*, 23(2), 552-558. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2011.08.031>
- Dangol, S., Poudel, D. K., Ojha, P. K., Maharjan, S., Poudel, A., Satyal, R., ... & Setzer, W. N. (2023). Essential oil composition analysis of *Cymbopogon* species from Eastern Nepal by GC-MS and chiral GC-MS, and antimicrobial activity of some major compounds. *Molecules*, 28(2), 543. <https://doi.org/10.3390/molecules28020543>
- Djarallah, M., & Bensaci, M. (2020). Utilisation des huiles essentielles dans la lutte biologique (Doctoral dissertation, Université Kasdi Merbah-Ouargla). <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/23717>
- Djerbal, M. (2023). Revue bibliographique sur les huiles essentielles (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- Elhrech, H., Aguerd, O., El Fessikh, M., Bakrim, S., Khalid, A., Abdalla, A. N., & Bouyahya, A. (2025). Determination of bioactive compounds and investigation of pharmacological properties of *Cymbopogon flexuosus* L. essential oils. *Journal of Molecular Structure*, 143576. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2025.143576>
- Khadri, A., Serralheiro, M. L. M., Nogueira, J. M. F., Neffati, M., Smiti, S., & Araújo, M. E. M. (2008). Antioxidant and antiacetylcholinesterase activities of essential oils from *Cymbopogon schoenanthus* L. Spreng. Determination of chemical composition by GC-mass spectrometry and ¹³C NMR. *Food chemistry*, 109(3), 630-637. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.12.070>
- Kiani, H. S., Ali, A., Zahra, S., Hassan, Z. U., Kubra, K. T., Azam, M., & Zahid, H. F. (2022). Phytochemical composition and pharmacological potential of lemongrass (*Cymbopogon*) and impact on gut microbiota. *Applied Chem*, 2(4), 229-246. <https://doi.org/10.3390/appliedchem2040016>
- Kieltyka-Dadasiewicz, A., Esteban, J., & Jabłońska-Trypuć, A. (2024). Antiviral, antibacterial, antifungal, and anticancer activity of plant materials derived from *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf Species. *Pharmaceuticals*, 17(6), 705. <https://doi.org/10.3390/ph17060705>
- Kokabi, E., Bouchart, V., Pronost, S., Lussot-Kervern, I., & Léon-Seck, A. (2024). Caractérisation *in vitro* de l'effet antimicrobien des huiles essentielles utilisées comme thérapie alternative en médecine vétérinaire équine. *Le Nouveau Praticien Vétérinaire-Équine*, 1718(1-2), 94-100.
- Koul, O., Walia, S., & Dhaliwal, G. S. (2008). Essential oils as green pesticides: Potential and constraints. *Biopesticides International*, 4(1), 63-84.

- Kumoro, A. C., Wardhani, D. H., Retnowati, D. S., & Haryani, K. (2021, February). A brief review on the characteristics, extraction and potential industrial applications of citronella grass (*Cymbopogon nardus*) and lemongrass (*Cymbopogon citratus*) essential oils. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1053, No. 1, p. 012118). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1053/1/012118>
- Laguerre, M., Javier López-Giraldo, L., Lecomte, J., Pina, M., & Villeneuve, P. (2007). Outils d'évaluation in vitro de la capacité antioxydante. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides*, 14(5), 278-292. <https://doi.org/10.1051/ocl.2007.0140>
- Lourenço, S. C., Moldão-Martins, M., & Alves, V. D. (2019). Antioxidants of natural plant origins: From sources to food industry applications. *Molecules*, 24(22), 4132. <https://doi.org/10.3390/molecules24224132>
- Mekhloufi, S., & Hadroug, B. (2024). Étude des huiles essentielles de la plante aromatique citronnelle de la région d'Ouargla (Master's dissertation, Université Kasdi Merbah Ouargla). <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/37702>
- Ndjouondo, G. P., Ngene, J. P., Ngoule, C. C., Kidik, P., Ndjib, R., Dibong, S. D., & Mpondo, M. E. (2015). Inventaire et caractérisation des plantes médicinales des sous-bassins versants Kambo et Longmayagui (Douala, Cameroun). *Journal of Animal and Plant Sciences*, 25(3), 3898-3916.
- Neffati, M., & Sghaier, M. (2014). Développement et valorisation des plantes aromatiques et médicinales (PAM) au niveau des zones désertiques de la région MENA (Algérie, Égypte, Jordanie, Maroc et Tunisie). Observatoire du Sahara et du Sahel : Tunis, Tunisie.
- Piaru, S. P., Perumal, S., Cai, L. W., Mahmud, R., Majid, A. M. S. A., Ismail, S., & Man, C. N. (2012). Chemical composition, anti-angiogenic and cytotoxicity activities of the essential oils of *Cymbopogon citratus* (lemon grass) against colorectal and breast carcinoma cell lines. *Journal of Essential Oil Research*, 24(5), 453-459. <https://doi.org/10.1080/10412905.2012.703496>
- Purkait, A., Biswas, S., Saha, S., Hazra, D. K., Roy, K., Biswas, P. K. & Kole, R. K. (2019). Formulation of plant-based insecticides, their bio-efficacy evaluation and chemical characterization. *Crop Protection*, 125, 104907. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.104907>
- Ramsey, J. T., Shropshire, B. C., Nagy, T. R., Chambers, K. D., Li, Y., & Korach, K. S. (2020). Essential oils and health. *The Yale journal of biology and medicine*, 93(2), 291-305.
- Rhimi, W., Mohammed, M. A., Zarea, A. A. K., Greco, G., Tempesta, M., Otranto, D., & Cafarchia, C. (2022). Antifungal, antioxidant and antibiofilm activities of essential oils of *Cymbopogon* spp. *Antibiotics*, 11(6), 829. <https://doi.org/10.3390/antibiotics11060829>
- Sabrina, D. J. E. H. I. C. H. E. (2022). Effets Thérapeutiques des Huiles Essentielles des Plantes Médicinales (Doctoral dissertation, University Center of Abdalhafid Boussouf-MILA).
- Variyana, Y., Ma'Sum, Z., Bhuana, D. S., & Mahfud, M. (2023). Extraction of java lemongrass (*Cymbopogon citratus*) using microwave-assisted hydro distillation in pilot scale: Parametric study and modelling. *ASEAN Journal of Chemical Engineering*, 23(2), 210-223.
- Wang, H., Zhang, R., Zhang, K., Chen, X., & Zhang, Y. (2022). Antioxidant, hypoglycemic and molecular docking studies of Methanolic extract, fractions and isolated compounds from aerial parts of *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf. *Molecules*, 27(9), 2858. <https://doi.org/10.3390/molecules27092858>
- Wu, H., Li, J., Jia, Y., Xiao, Z., Li, P., Xie, Y. & Li, C. (2019). Essential oil extracted from *Cymbopogon citronella* leaves by supercritical carbon dioxide: antioxidant and antimicrobial activities. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 2019(1), 8192439. <https://doi.org/10.1155/2019/8192439>
- Xiao, S., Cui, P., Shi, W., & Zhang, Y. (2020). Identification of essential oils with activity against stationary-phase *Staphylococcus aureus*. *BMC complementary medicine and therapies*, 20(1), 99. <https://doi.org/10.1186/s12906-020-02898-4>
- Yahi, A., & Chihab, M. (2024). Exploration ethnobotanique des plantes médicinales employées par les herboristes d'Ain Temouchent pour le traitement des affections gastro-intestinales (Doctoral dissertation).