



HAL
open science

Essential oil-based micro-and nanoemulsions for officinal preparations

Nicolas Rolley, L Bureau, N Brandhonneur, G Dollo

► **To cite this version:**

Nicolas Rolley, L Bureau, N Brandhonneur, G Dollo. Essential oil-based micro-and nanoemulsions for officinal preparations. *Phytothérapie*, 2024, 22 (4-5), pp.217. <10.3166/phyto-2024-0430>. <hal-04869840>

HAL Id: hal-04869840

<https://hal.science/hal-04869840v1>

Submitted on 7 Jan 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Micro et nano-émulsion à base d'huile essentielle en préparations officinales

Essential oil-based micro- and nano-emulsions for officinal preparations

N. Rolley¹, L. Bureau^{2,3},
N. Brandhonneur¹, G. Dollo¹

¹ Univ Rennes, ISCR (Institut des sciences chimiques de Rennes), UMR 6226, F-35000 Rennes, France

² IFAS (Institut de formation des acteurs de santé), 42, rue d'Arnage, F-72100 Le Mans, France

³ Université Rennes (PAST 2008-2023), UFR Pharmacie Campus de Villejean, 2, avenue du Professeur Léon Bernard CS 34317, F-35000 Rennes cedex, France

© JLE 2024

Correspondance : L. Bureau
bureau.loic@hotmail.fr

▼ Résumé

Les préparations officinales à base d'huiles essentielles font l'objet de monographies au formulaire national. Les micro-émulsions et nanoémulsions représentent un potentiel de solutions en aromathérapie. Une excellente alternative aux formulations traditionnelles notamment les émulsions.

• **Mots clés :** Micro-émulsion ; Nano-émulsion ; Huile essentielle ; Aromathérapie

▼ Abstract

Officinal preparations based on essential oils are the subject of monographs in the national form. Micro-emulsions and nanoemulsions represent potential solutions in aromatherapy. An excellent alternative to traditional formulations, particularly emulsions.

• **Keywords:** Microemulsion; Nanoemulsion; Essential oil; Aromatherapy

Les huiles essentielles (HE) insolubles dans l'eau, soulèvent divers problèmes dans leurs utilisations avec des formes galéniques conventionnelles. Beaucoup de pharmaciens d'officine utilisent le Disper[®] ou le Solubol[®] pour solubiliser les HE et obtenir des émulsions laiteuses. Pour améliorer la solubilité, la biodisponibilité et obtenir le meilleur effet thérapeutique en aromathérapie, la nano-émulsion pourrait être une alternative.

Données relatives aux micro-émulsions

La micro-émulsion est généralement un mélange liquide transparent et isotrope composé obtenue à partir de deux phases non miscibles [1] : une phase huileuse et une phase aqueuse, dans lesquelles des tensioactif et cotensioactif viennent stabiliser les nanostructures formées. Les micro-émulsions sont des mélanges monophasiques, dans lequel un ou plusieurs tensioactifs rendent possible la coexistence de la phase aqueuse et huile en générant des gouttelettes de petites tailles avec des diamètres allant de 10 à 100 nm ou impliquant des micelles, des phases lamellaires ou des structures bicontinues [2]. De plus les micro-émulsions sont des systèmes thermodynamiquement stables, une propriété qui leur confère la possibilité d'être diluée sans

Pour citer cet article : Rolley N, Bureau L, Brandhonneur N, Dollo G (2024) Micro et nano-émulsion à base d'huile essentielle en préparations officinales. *Phytothérapie* xx:1-5. doi : 10.3166/phyto- 2024-0430

modifier de leur stabilité physique ou chimique. Elles sont formulées sous forme de solutions concentrées contenant de l'HE huile et des tensioactifs [3].

Par l'incorporation de l'eau à la phase huileuse, le système va s'auto-arranger (auto-émulsionner) en divers types de structures, passant des micelles inverses gonflées par l'eau au systèmes bicontinues et micelles gonflées par l'huile, pour conduire à des micro-émulsions. Pour faciliter la prédiction des caractéristiques de solubilisation des micro-émulsions, les diagrammes de phase ternaire sont des outils particulièrement adaptés comme l'utilisation de la lécithine de soja comme tensioactif. Les micro-émulsions sont utilisées dans de nombreux domaines applicatifs industriels, pharmaceutiques, phytosanitaires, cosmétiques...

Les gouttelettes nanométriques encadrées de tensioactif dans la micro-émulsion peuvent pénétrer dans la surface de la peau pour réduire sa fonction de barrière. Cela fait de la micro-émulsion une préparation idéale pour l'administration transdermique de médicaments. La perméabilité de la micro-émulsion peut être encore améliorée lorsque des huiles essentielles capables de dissoudre la couche cornée sont utilisées comme phase huileuse [1]. Cependant, la volatilité des huiles essentielles peut raccourcir le temps de rétention de la micro-émulsion à la surface de la peau. Il a été constaté que les volatilisations successives de l'éthanol, de l'eau et de la menthone constituaient les événements majeurs lors du processus de volatilisation de la micro-émulsion composée d'huile essentielle de menthe poivrée. Après un processus de volatilisation de 20 minutes, la micro-émulsion restante contenait encore une quantité considérable d'huile essentielle de menthe poivrée pour agir sur la peau.

La formule a été réalisée avec un mélange d'huile de castor hydrogénée PEG-40 (combinaison de polyéthylène glycol synthétique avec de l'huile de ricin d'origine naturelle) et de Tween 20 (monolaurate de polyoxyéthylène sorbitane) (3/2, M/M). Une quantité d'éthanol égale à celle du Tween 20 a été utilisée dans le mélange en tant que cotensioactif. À 5 % d'HE de menthe poivrée dans 13 % du mélange de surfactant tensioactif/cotensioactif combinés est successivement additionné 13 % d'éthanol puis l'eau (69 %) [1].

Les microémulsions à base d'HE protègent la volatilité des HE, et les protègent de la dégradation en présence de la lumière, de l'air et de la température [4,5].

Dans ses travaux, Zhang a également démontré que les systèmes micro-émulsionnés de magnolol permettaient

une amélioration de la solubilité aqueuse du magnolol, ainsi qu'une amélioration de la stabilité et la biodisponibilité par voie orale [6].

Données relatives aux nano-émulsions

Une nano-émulsion est un système particulaire colloïdale de petites gouttelettes dispersées (appelé phase dispersée) dans un autre liquide (appelé phase dispersante) [7]. Les nano-émulsions sont une dispersion biphasique de deux liquides non miscibles : soit des gouttelettes d'eau dans l'huile (E/H), soit des gouttelettes d'huile dans l'eau (H/E) stabilisées par un tensioactif amphiphile [8]. Les nano-émulsions sont des systèmes isotropes thermodynamiquement instables dont la taille des gouttes est de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de nanomètres impliquant une cinétique de déstabilisation très lente (pouvant aller jusqu'à plusieurs années), on parle alors de grande stabilité cinétique [9,10].

Les formes nano-émulsionnées peuvent être utilisées pour favoriser la biodisponibilité des principes actifs en les solubilisant dans la phase dispersée. Les nano-émulsions peuvent être employées à diverses applications telles que l'administration de médicaments, les applications alimentaires et les formulations de pesticides dans l'objectif d'améliorer la biodisponibilité des substances actives [7, 11].

Application des micro-émulsions aux huiles essentielles et leurs constituants

Il est possible de trouver dans la littérature différentes applications des nano-émulsions aux composés des huiles essentielles tels que : le carvacrol [12,13], le thymol [14], l'eugénol [15], le cinnamaldéhyde [16], le limonène [17] ou encore la thymoquinone [18].

Ainsi une nano-émulsion monodispersée d'HE de thym avec une taille de gouttelettes d'environ 1202 nm s'est révélée stable et monodispersée pendant 4 mois, permettant d'inhiber la croissance bactérienne de *B. subtilis*, *E. coli*, *P. aeruginosa* et *S. aureus* pendant cette période [11]. Une autre nano-émulsion avec l'HE de thym, dont la taille des particules sphériques est comprise entre 20 à 55 nm à également permet de mettre en évidence l'activité antimicrobienne de l'HE de thym mais également une activité antifongique sur *A. brasiliensis* et *A. fumigatus* [19]. Dans les deux cas, le Tween 80, un tensioactif non-ionique avec un HLB (*hydrophilic-lipophilic balance*) de 15 a été employé pour faciliter l'émulsion huile dans eau (H/E).

Dans le cas de la nano-émulsion avec l'HE de clou de girofle, les essais de concentration minimale inhibitrice

(CMI) comprise entre 0,3 et 5 mg/ml selon les bactéries, ont permis de mettre également en évidence l'activité bactéricide/bactériostatique de l'HE de clou de girofle [20]. Une activité antifongique est également rapportée. Une nouvelle fois, le Tween 80 a été utilisé pour formuler cette nano-émulsion. Outre les effets antibactériens déjà présentés, Nirmal et al. ont également formulé une nano-émulsion d'HE de clou de girofle comme solution de traitement contre le cancer du rein [21]. Pour cela, les auteurs ont formulé avec un mélange en proportion variable de deux tensioactifs : Tween 20 et Tween 80. Plusieurs formulations avec des concentrations différentes d'HE ont été testées, conduisant à des solutions claires et transparentes pour des concentration d'HE de 5 à 15 % et des teneurs en tensioactif 3 à 5 fois celle de l'HE. En dehors de ces conditions les formulations étaient laiteuses et blanchâtres. Il faut noter qu'avec une proportion plus importante de Tween 80 les résultats sont meilleurs. Pour la réalisation de cette étude, les auteurs ont utilisé des diagrammes de phase ternaires permettant alors de minimiser le nombre d'essais pour l'obtention d'une cartographie efficiente.

Les propriétés bioactives de la nano-émulsion d'HE de clou de girofle (*Syzygium sp.*) ouvre ainsi la possibilité d'utiliser l'ingrédient bioactif dans l'enrobage des fruits et légumes frais [22]. Garcia et al. conclut que les nano-émulsions sont des systèmes de délivrance d'ingrédient actif permettant d'augmenter significativement l'efficacité antimicrobienne des HE [23].

Nirmala et al. ont procédé de manière analogue avec l'ajout d'une source d'énergie extérieure au système auto-émulsionné (les ultrasons) pour encapsuler l'HE de graines de céleri (*Apium graveolens*) [24], et celle de graine de cumin (*Cuminum cyminum*) [25]. L'efficacité des HE (clou de girofle, cannelle et curcuma) sous forme de nano-émulsion en tant qu'antiparasitaire vétérinaire contre les ectoparasites est améliorée avec diminution de la concentration létale [26]. À faible concentration, les nano-émulsions d'HE d'arbre à thé et de citron présentent une activité acaricide [27].

La nano-émulsion d'HE de santal peut être utilisée par voie topique contre les brûlures cutanées [28]. La nano-émulsion d'huile essentielle de gingembre a réduit le volume et le poids de la tumeur *in vivo*, prolongé la durée de vie des animaux et amélioré la fonction hépatique et rénale chez les souris [29]. Ces effets étaient supérieurs à l'utilisation d'HE de gingembre libre. D'autres HE ont fait l'objet de nanoformulation [30, 31] : HE de fenouil [32], HE de clou de girofle [33], HE de menthe poivrée et de cannelle [34], HE de jasmin et de menthe poivrée [35], d'eucalyptus (*E. globulus*) [36], origan [37].

Commentaires et discussion

Commençons par une anecdote. Il y a une vingtaine d'années l'un d'entre nous a été amené à réaliser une formulation pour traiter un élevage de volailles en agriculture biologique objet d'une épizootie. Après une série d'essais pour tester les différents tensioactifs utilisés en pharmacie, nous avons retenu le Tween 80 à partie égale avec l'éthanol à 80 % (V/V). Au final la formulation était mélange HE 5 %, Tween 80 10 %, éthanol 10 % et eau QSP 100 %. Ces proportions peuvent être diminuées lorsque les principaux composants des HE sont des terpénoïdes (terpènes avec un atome d'oxygène et une fonction oxygénée). La réalisation est très simple : il suffit d'incorporer les ingrédients successivement et progressivement sous une agitation manuelle par simple rotation du récipient avec le poignet.

Nous avons fait une observation qui nous avait étonnée : lors de l'ajout de l'eau petit à petit, dans le mélange translucide la viscosité augmentait comme celle d'un sirop ou de la glycérine puis s'épaississait davantage jusqu'à devenir visqueux, une sorte de pseudo-gel, qui pour finir conduisait à la formation d'une solution liquide incolore. C'est seulement quelques années plus tard, qu'un collaborateur de l'entreprise Gattefossé nous a expliqué les mécanismes physico-chimiques impliqués. Pas banal me direz-vous eu égard à René-Maurice Gattefossé fondateur du terme aromathérapie. Quoi qu'il en soit, la formulation finale était pour nous une micro-émulsion H/E que l'on pouvait diluer à l'infini et donc disperser dans l'eau de boisson des volailles. Selon un collègue galéniste, le résultat ne serait pas une micro-émulsion mais plutôt une nano-émulsion.

Pour comprendre au mieux les phénomènes sous-jacents dans cette nano-émulsion, il ne faut plus appréhender le mécanisme de formulation en s'aidant de la méthode du HLB (balance hydrophile lipophile) mais selon la méthode du HLD (différence hydrophile lipophile). Le HLB a été introduit par Griffin en 1949 avec pour objectif de quantifier l'affinité relative d'un tensioactif pour la phase aqueuse ou huileuse, en étant basé sur une règle simple liée à l'importance relative du pôle hydrophile par rapport au pôle hydrophobe. Néanmoins, bien que le HLB soit un bon indicateur pour qualifier un tensioactif et aider dans l'approche de la formulation des émulsions, il présente des limites. En effet, il n'intègre que les propriétés du tensioactif seul et ne considère pas l'environnement physico-chimique du système [38]. Or, dans notre système, une autre variable n'est pas considérée : la présence d'alcool. Il est alors nécessaire d'appréhender cette formulation d'un nouvel œil en considérant cet alcool. Puisque la méthode du HLB ne tient pas compte

de l'environnement physico-chimique du système, tournons-nous maintenant vers la notion de différence hydrophile/lipophile (HLD), qui permet de calculer et de prédire les compensations entre les effets des différentes variables [39]. Ainsi, la HLD est définie comme étant l'expression de « l'écart à la formulation optimale », où la notion de formulation optimale correspond à une formulation précise pour laquelle entre autres : la solubilisation de l'eau et de l'huile est maximale pour une quantité donnée de tensioactif ; les tensions interfaciales micro-émulsion/eau et micro-émulsion/huile sont extrêmement faibles.

Fort de cette compréhension de la modification de l'affinité hydrophile/lipophile de notre tensioactif, nous pouvons maintenant expliquer les différentes étapes successives ayant conduit à la formation de notre nano-émulsion d'HE. La méthode de formulation consiste à ajouter de l'eau à un mélange d'huile et de tensioactif miscibles ou sous forme de deux phases séparées et pratiquement sans eau. Cette méthode est appelée la méthode PIC pour inversion de phase en composition. L'ajout d'eau au système conduit à l'augmentation de l'hydratation du tensioactif. Si l'ajout d'eau est suffisamment rapide et qu'il est réalisé sous agitation, cette PIC peut donner lieu à la formation d'une nano-émulsion H/E. Durant l'ajout d'eau, un enchaînement de structures mésomorphes est attendu, parmi lesquelles : micelles gonflées à l'eau, phases lamellaires, phases bicontinues cubiques ou éponges, phases hexagonales et dispersion de micelles gonflées d'huile coexistant éventuellement avec un excès d'huile. Phase qui correspond alors avec notre mélange translucide visqueux décrit précédemment. Par la suite l'ajout d'eau conduit à une nano-émulsion H/E [40].

Depuis nous avons transmis ce savoir-faire aux pharmaciens que nous avons formé et mis en place une séance de travaux pratiques dans le cadre du DU Aromathérapie de Rennes. Quelques contraintes à respecter : les teneurs en Tween 80 et éthanol doivent être au moins du double de celle de l'HE pour assurer une micro-émulsion et non une émulsion. De même, l'ordre d'incorporation des ingrédients est important à respecter. Ici, nous avons utilisé le Tween 80¹ ou polysorbate 80 (Polyoxyéthylène (80) sorbitan monooleate) comme tensioactif non ionique (de HLB élevé : 15). Il s'agit d'un émulsifiant souvent couramment utilisé pour la formulation des médicaments ou la préparation des produits pharmaceutiques, alimentaires et cosmétique. Ce composé synthétique est un liquide jaune visqueux et soluble dans l'eau. D'un point de vue

réglementaire, le polysorbate 80 fait l'objet d'une monographie à la pharmacopée européenne.

Deux émulsionnants sont traditionnellement utilisés dans les préparatoires : le Disper² et le Solubol. Nous les présentons rapidement. Le Disper est une formulation à base d'un extrait alcoolique de phospholipides végétaux dont de la lécithine (Alcoolat de membranes de cellules végétales) et d'antioxydants. L'utilisation recommandée est 4 à 10 fois la quantité d'HE à disperser. Le résultat est une émulsion laiteuse. Le prix au litre est supérieur à 100 euros (jusqu'à plusieurs centaines d'euros !). Le Solubol est également une formulation complexe à base de lécithine avec un tarif plus abordable. De même le résultat est une émulsion laiteuse. De notre point de vue une simple solution alcoolique de lécithine serait beaucoup plus économique que ces excipients complexes. L'HE de carvi peut être émulsionnée avec une association lécithine de soja et β -globuline [41].

Les données de la littérature présentées précédemment confirment non seulement l'intérêt des micro- et/ou nano-émulsions à base d'HE mais surtout l'étendue des applications potentielles. Si précédemment, les données étaient peu nombreuses, les publications citées en référence témoignent maintenant de l'actualité de la méthode et des techniques associées.

Conclusion

Les avantages des micro- et/ou nano-émulsions sont multiples et indéniables en aromathérapie. Les excipients, principalement les tensioactifs, sont réglementaires, techniquement performants, simples à mettre en oeuvre et relativement économiques. Ces formulations améliorent la biodisponibilité des HE et leur efficacité biologique. Les micro/nano-émulsions représentent la meilleure solution pour réaliser des préparations magistrales ou officinales à base d'huiles essentielles, qu'elles soient destinées à la l'administration par voie orale, par voie topique ou inhalation.

Liens d'intérêts :

[\[\[Merci de compléter\]\]](#)

Références

- Chen H, Xiao Y, Wang Y, et al (2024) Two-dimensional correlation infrared spectroscopy elucidated the volatilization process of the microemulsion composed of peppermint essential oil and composite herbal extract. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc* 311:124009

¹ Tween 80 est une marque de Croda.

² Disper est une marque du laboratoire Combe d'Ase.

- 2 • Tartaro G, Mateos H, Schirone D, Angelico R, Palazzo G. (2020) Microemulsion Microstructure(s): A Tutorial Review. *Nanomaterials* (Basel) 10:1657
- 3 • Nouraei M, Acosta EJ (2017) Predicting solubilisation features of ternary phase diagrams of fully dilutable lecithin linker microemulsions. *J Colloid Interface Sci* 495:178-90
- 4 • Thakur D, Kaur G, Puri A, Nanda R (2021) Therapeutic Potential of Essential Oil-based Microemulsions: Reviewing State-of-the-art. *Curr Drug Deliv* 18:1218-33
- 5 • Xavier-Junior FH, Vauthier C, Morais AR, et al (2017) Microemulsion systems containing bioactive natural oils: an overview on the state of the art. *Drug Dev Ind Pharm*. 43:700-14
- 6 • Zhang H, Zhang Y, Hu Y, et al (2024) Improving cellular uptake and synergetic anti-tumor effects of magnolol and Brucea javanica oil through self-microemulsion. *Drug Dev Ind Pharm* 18:1-9
- 7 • Kumar V, Garg V, Saini N, et al (2024) An Updated Review on Nanoemulsion: Factory for Food and Drug Delivery. *Curr Pharm Biotechnol* 25:2218-52
- 8 • Singh Y, Meher JG, Raval K, et al (2017) Nanoemulsion: Concepts, development and applications in drug delivery. *J Control Release* 252:28-49
- 9 • Gupta A, Narsimhan V, Hatton TA, Doyle PS (2016) Kinetics of the change in droplet size during nanoemulsion formation. *Langmuir* 32:11551-9
- 10 • Pandey VK, Srivastava S, Ashish, et al (2023) Bioactive properties of clove (*Syzygium aromaticum*) essential oil nanoemulsion: A comprehensive review. *Heliyon* 10:e22437
- 11 • Nasra S, Meghani N, Kumar A (2024) Nanoemulsion-based system as a novel and promising approach for enhancing the antimicrobial and antitumoral activity of *Thymus vulgaris* (L.) oil in human hepatocellular carcinoma cells. *Appl Biochem Biotechnol* 196:949-70
- 12 • Mourão MRN, Macedo CAF, Ribeiro TF, et al (2024) Carvacrol-loaded nanoemulsion promotes tocolytic and anti-dysmenorrhea effects in rodents. *Pharmacology* 109:115-20
- 13 • Choudhary P, Bhanjana G, Kumar S, Dilbaghi N (2024) Development and evaluation of eco-friendly carvacrol nanoemulsion as a sustainable biopesticide against bacterial leaf blight of cluster bean. *Pest Manag Sci* 80:452-62
- 14 • Amiri S, Sepahvand S, Radi M, Abedi E (2024) A comparative study between the performance of thymol-nanoemulsion and thymol-loaded nanostructured lipid carriers on the textural, microbial, and sensory characteristics of sausage. *Curr Res Food Sci* 8:100704
- 15 • Keerthana M, Menon PM, C GPD, Natarajan C (2024) Interaction of eugenol-based anti-tuberculosis nanoemulsion with bovine serum albumin: A spectroscopic study including Rifampicin, Isoniazid, Pyrazinamide, and Ethambutol. *Heliyon* 10:e28306
- 16 • Hojati N, Amiri S, Abedi E, Radi M (2024) Effect of cinnamaldehyde-nanoemulsion and nanostructured lipid carriers on physicochemical attributes of reduced-nitrite sausages. *Food Chem* 444:138658
- 17 • Ibrahim SM, Abdel-Baki AS, Al-Quraishy S, et al (2023) Efficacy of D-Limonene nanoemulsion against *Rhipicephalus annulatus* and *Rhipicephalus sanguineus* ticks. *Acta Parasitol*
- 18 • Karim B, Arabameri M, Alimoradi F, et al (2024) Protective effect of thymoquinone nanoemulsion in reducing the cardiotoxic effect of 5-fluorouracil in rats. *Drug Dev Res* 85:e22171
- 19 • Doghish AS, Shehabeldine AM, El-Mahdy HA, et al (2023) *Thymus Vulgaris* oil nanoemulsion: synthesis, characterization, antimicrobial and anticancer activities. *Molecules* 28:6910
- 20 • Shehabeldine AM, Doghish AS, El-Dakrouy WA, et al (2023) Antimicrobial, antibiofilm, and anticancer activities of syzygium aromaticum essential oil nanoemulsion. *Molecules* 28:5812
- 21 • Nirmala MJ, Durai L, Gopakumar V, et al (2019) Anticancer and antibacterial effects of a clove bud essential oil-based nanoscale emulsion system. *Int J Nanomedicine* 14:6439-50
- 22 • Pandey VK, Srivastava S, Ashish, et al (2023) Bioactive properties of clove (*Syzygium aromaticum*) essential oil nanoemulsion: A comprehensive review. *Heliyon* 10:e22437
- 23 • Garcia CR, Malik MH, Biswas S, et al (2022) Nanoemulsion delivery systems for enhanced efficacy of antimicrobials and essential oils. *Biomater Sci* 10:633-53
- 24 • Nirmala MJ, Durai L, Gopakumar V, et al (2020) Preparation of celery essential oil-based nanoemulsion by ultrasonication and evaluation of its potential anticancer and antibacterial activity. *Int J Nanomedicine* 15:7651-66
- 25 • Nirmala MJ, Durai L, Rao KA, et al (2020) Ultrasonic nanoemulsification of Cuminum cyminum essential oil and its applications in medicine. *Int J Nanomedicine* 15:795-807
- 26 • Lakyat A, Pumnuan J, Doungnapa T, et al (2024) Nanoemulsion-based plant essential oil formulations: in vitro evaluation of pesticidal activity against ectoparasites in poultry. *Poult Sci* 103:103245
- 27 • Ibrahim SM, Wahba AA, Farghali AA, et al (2022) Acaricidal activity of Tea Tree and Lemon Oil nanoemulsions against *Rhipicephalus annulatus*. *Pathogens* 11:1506
- 28 • Giri VP, Pandey S, Shukla P, et al (2024) Facile fabrication of sandalwood oil-based nanoemulsion to intensify the fatty acid composition in burned and rough skin. *ACS Omega* 9:6305-15
- 29 • Alharbi DS, Albalawi SF, Alghrid ST, et al (2023) Ginger oil nanoemulsion formulation augments its antiproliferative effect in ehrlich solid tumor model. *Foods* 12:4139
- 30 • Taktak NEM, Badawy MEI, Awad OM, et al (2022) Nanoemulsions containing some plant essential oils as promising formulations against *Culex pipiens* (L.) larvae and their biochemical studies. *Pestic Biochem Physiol* 185:105151
- 31 • Wan J, Zhong S, Schwarz P, et al (2019) Physical properties, antifungal and mycotoxin inhibitory activities of five essential oil nanoemulsions: Impact of oil compositions and processing parameters. *Food Chem* 291:199-206
- 32 • Nie H, Liao H, Wen J, et al (2024) Foeniculum vulgare essential oil nanoemulsion inhibits *Fusarium oxysporum* causing *Panax notoginseng* root-rot disease. *J Ginseng Res* 48:236-44
- 33 • Fan S, Yin X, Liu X, et al (2024) Enhancing bread preservation through non-contact application of starch-based composite film infused with clove essential oil nanoemulsion. *Int J Biol Macromol* 263:130297
- 34 • Özakar E, Alparslan L, Adigüzel MC, et al (2024) A comprehensive study on peppermint oil and cinnamon oil as nanoemulsion: preparation, stability, cytotoxicity, antimicrobial, antifungal, and antioxidant activity. *Curr Drug Deliv* 21:603-22
- 35 • Radwan IT, Khater HF, Mohammed SH, et al (2024) Synthesis of eco-friendly layered double hydroxide and nanoemulsion for jasmine and peppermint oils and their larvicidal activities against *Culex pipiens* Linnaeus. *Sci Rep* 14:6884
- 36 • Sabzalzade S, Amani A, Vatandoost H, et al (2021) Evaluation of nanoemulsion of eucalyptus globulus oil as potent botanical larvicide against malaria vector, anopheles stephensi and west nile vector, culex pipiens under laboratory and semi-field conditions. *J Arthropod Borne Dis* 15:380-8
- 37 • Zhao S, Wang Z, Wang X, et al (2023) Characterization of nanoemulsions stabilized with different emulsifiers and their encapsulation efficiency for oregano essential oil: Tween 80, soybean protein isolate, tea saponin, and soy lecithin. *Foods* 12:3183
- 38 • Márqueza N, Bravao B, Cháveza G, et al (2000) Analysis of polyethoxylated surfactants in microemulsion-oil-water systems. *Anal Chim Acta* 405:267-75
- 39 • Briceño M, Salager JL, Bertrand J, et al (2001) Influence of dispersed phase content and viscosity on the mixing of concentrated oil-in-water emulsions in the transition flow regime. *Trans IChemE A* 79:943-8
- 40 • Roger K (2016) Nanoemulsification in the vicinity of phase inversion: Disruption of bicontinuous structures in oil/surfactant/water systems. *Curr Opin Colloid Interface Sci* 25:120-8
- 41 • Bylaite E, Nylander T, Venskutonis R, et al (2001) Emulsification of caraway essential oil in water by lecithin and beta-lactoglobulin: emulsion stability and properties of the formed oil-aqueous interface. *Colloids Surf B Biointerfaces* 20:327-40