الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية.
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement
Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 20 Août 1955 - SKIKDA -
Faculté des Sciences
Dpartement D' Agronomie
Réf : / D S AGRO/2026

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة 20 أوت 1955سكيكدة
كلية العلوم
قسم علوم الفلاحة
/ رقم : / ق ع ف2026

Skikda le : 07/07/2026

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

Je soussigné(e) : Dr. Abdelbaki Amira Président(e) de Jury

Certifie que L'étudiant(e) :MEKSEN Bachir Islelm.

Spécialité : Agro – alimentaire et Qualité des produits

Intitulé : Formulation et développement d'une boisson énergisante fonctionnelle sans caféine ni édulcorants artificiels : étude de stabilité par nanoémulsification

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.

Directeur de mémoire	Président(e) de Jury

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية.
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement
Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 20 Août 1955 - SKIKDA -
Faculté des Sciences
Dpartement D' Agronomie
Réf : / D S AGRO/2026

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة 20 أوت 1955سكيكدة
كلية العلوم
قسم علوم الفلاحة
/ رقم : / ق ع ف2026

Skikda le : 07/07/2026

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

Je soussigné(e) : Dr. Abdelbaki Amira Président(e) de Jury

Certifie que L'étudiant(e) : Meliani Amine .

Spécialité : Agro – alimentaire et Qualité des produits

Intitulé : Formulation et développement d'une boisson énergisante fonctionnelle sans caféine ni édulcorants artificiels : étude de stabilité par nanoémulsification

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.

Directeur de mémoire	Président(e) de Jury

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية.
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement
Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 20 Août 1955 - SKIKDA -
Faculté des Sciences
Dpartement D' Agronomie
Réf : / D S AGRO/2026

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة 20 أوت 1955سكيكدة
كلية العلوم
قسم علوم الفلاحة
/ رقم : / ق ع ف2026

Skikda le : 07/07/2026

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

Je soussigné(e) : Dr. Abdelbaki Amira Président(e) de Jury

Certifie que L'étudiant(e) : Tabet Abderrahim.

Spécialité : Agro – alimentaire et Qualité des produits

Intitulé : Formulation et développement d'une boisson énergisante fonctionnelle sans caféine ni édulcorants artificiels : étude de stabilité par nanoémulsification

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.

Directeur de mémoire	Président(e) de Jury
	أ. عبد الباقي الصيرة مديرة مركز تطوير المقاولاتية جامعة سكيكدة

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية،
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement
Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 20 Août 1955 - SKIKDA -
Faculté des Sciences
Dpartement D' Agronomie
Réf : / D S AGRO/2026

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة 20 أوت 1955سكيكدة
كلية العلوم
قسم علوم الفلاحة
/ رقم : / ق ع ف2026

Skikda le : 07/07/2026

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

Je soussigné(e) : Dr. Abdelbaki Amira Président(e) de Jury

Certifie que L'étudiant(e) :Deh Mohamed Elhachimi Abdellahi.

Spécialité : Agro – alimentaire et Qualité des produits

Intitulé : Formulation et développement d'une boisson énergisante fonctionnelle sans caféine ni édulcorants artificiels : étude de stabilité par nanoémulsification

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.

Directeur de mémoire	Président(e) de Jury
	أ. عبد الباقي أميرة مديرة مركز تطوير المقاولاتية جامعة سكيكدة

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية.
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement
Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 20 Août 1955 - SKIKDA -
Faculté des Sciences
Dpartement D' Agronomie
Réf : / D S AGRO/2026

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة 20 أوت 1955سكيكدة
كلية العلوم
قسم علوم الفلاحة
/ رقم : / ق ع ف2026

Skikda le : 07/07/2026

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

Je soussigné(e) : Dr. Abdelbaki Amira Président(e) de Jury

Certifie que L'étudiant(e) : Laouira Abderrahmen.

Spécialité : Agro – alimentaire et Qualité des produits

Intitulé : Formulation et développement d'une boisson énergisante fonctionnelle sans caféine ni édulcorants artificiels : étude de stabilité par nanoémulsification

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.

Directeur de mémoire	Président(e) de Jury
	أ. عبد النبي عاقلي أمينة مديرة مركز تطوير المقاولاتية لجامعة سكيكدة

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Faculté des sciences

Département de Sciences Agronomiques

En Vue de l'obtention du Diplôme de Master

Spécialité: Agro – alimentaire et qualité des produits

Thème :

Projet visant à obtenir un certificat d'entreprise émergente conformément à la décision ministérielle 1275 :

Formulation et développement d'une boisson énergisante fonctionnelle sans caféine ni édulcorants artificiels : étude de stabilité par nanoémulsification

Présenté par :

Laouira Abderrahmene

Tabet Abderrahim

Meliani Amin

Mohamed Elhachimi Abdellahi Deh

Meksen Bechir Islam

Soutenue devant le jury :

Président(e) : Dr. Abdelbaki Amira		**UNIV SKIKDA**
Encadreur : Dr. Laib Imen	**M.C.A**	**UNIV SKIKDA**
Examinateur : Dr. Hafsi Zakaria	**M.C.B**	**UNIV SKIKDA**
Expert de BMC : Dr. Harmouch Imane		**UNIV SKIKDA**
Représentant de partenariat économique :	**Khribech Houcine**	

Année Universitaire :2025-2026

Remerciements

Au terme de ce travail, il est particulièrement agréable d'exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce mémoire.

Nous tenons avant tout à remercier Allah, le Tout-Puissant, qui nous a accordé la santé, la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail. Par Sa grâce et Sa miséricorde, nous avons pu surmonter les difficultés rencontrées tout au long de ce parcours et atteindre cet objectif.

Nous adressons ensuite nos plus sincères remerciements à nos très chers parents, à qui nous devons énormément. Leur amour inconditionnel, leurs sacrifices, leurs encouragements constants et leur soutien indéfectible ont

toujours été une source de motivation et de confiance. Ils ont été présents à chaque étape de nos parcours académique et personnel. Qu'ils trouvent à travers ce travail l'expression de nos profondes reconnaissances, de notre respect et de nos affections.

Nous souhaitons exprimer nos vives gratitudes à Dr.Laib Imen, notre encadrante, pour la confiance qu'elle nous a accordée, pour sa disponibilité, sa patience ainsi que pour la qualité de ses conseils et de son accompagnement. Ses orientations pertinentes, ses remarques constructives et

son soutien constant ont été d'une grande importance dans la réalisation de ce mémoire. Son sérieux, son professionnalisme et son dévouement ont constitué pour nous une véritable source d'inspiration.

Nos remerciements s'adressent également aux honorables membres du jury, qui ont accepté d'évaluer ce travail. Nous leur sommes reconnaissant pour le

temps qu'ils ont consacré à sa lecture ainsi que pour l'intérêt qu'ils lui portent.

Leurs observations, leurs recommandations et leurs critiques constructives contribueront sans aucun doute à enrichir ce travail et à approfondir nos réflexions scientifiques.

Nos remerciements a tout les profs qui sont la durant tout notre parcours a nous soutenir et a nous conseil ainsi que nos très chers remerciement a notre ingénieuse, cheffe du laboratoire physique du sol et hydraulique, IG. Tourki affef pour sont soutient constant et pour sa plein contribution durant tout notre stage dans labo

Enfin, nos pensées reconnaissantes vont à toute nos familles, qui nous ont toujours soutenu et encouragé. Leur présence, leur confiance et leur

encouragements ont été essentiels dans les moments de doute comme dans les moments de réussite. Nous leur exprimons toute nos gratitudes pour leur soutien moral et leur affection

Résumé

Ce travail présente la formulation et le développement d'une boisson énergisante fonctionnelle (BEF) entièrement naturelle, sans caféine ni édulcorants artificiels, dans le cadre d'un projet de startup universitaire. La formulation repose sur une synergie d'ingrédients bioactifs: ginseng, thé matcha, L-théanine, vitamine B12 et vitamine C : encapsulés dans une nanoemulsions huile dans-eau stabilisée à la lécithine de soja, préparée par ultrasonication à sonde (20 kHz). Les actifs ont été extraits par macération éthanolique à froid et par Hydrodistillation pour les huiles essentielles aromatiques (fraise, orange,). La nanoémulsification a permis d'obtenir des gouttelettes de 145 ± 18 nm avec un indice de polydispersité (PDI) de 0,18 ± 0,03, confirmant une distribution homogène et une stabilité cinétique sur 30 jours à 4 °C. L'évaluation sensorielle hédonique réalisée sur 30 panélistes a révélé une appréciation globale de 7,7/9, avec une forte intention d'achat (26/30 panelistes). Sur le plan entrepreneurial, le projet vise le marché algérien des boissons fonctionnelles premium, estimé à plus de 2,5 millions de consommateurs healthconscious, avec un seuil de rentabilité prévu entre 18 et 24 mois. Ces résultats valident la faisabilité scientifique et commerciale du concept et constituent les bases d'une future mise à l'échelle industrielle.

Mots-clés : boisson énergisante fonctionnelle, nanoémulsification, ultrasonication, sans caféine, ginseng, matcha, L-théanine, stabilité, startup agroalimentaire.

Abstract

This work presents the formulation and development of a fully natural functional energy drink (FED), free from caffeine and artificial sweeteners, as part of a university startup project. The formulation is based on a synergistic blend of bioactive ingredients: ginseng, matcha tea, Ltheanine, vitamin B12, and vitamin C: encapsulated in a soy lecithin-stabilized oil-in-water nanoemulsion prepared by probe ultrasonication (20 kHz). Active compounds were extracted through cold ethanolic maceration and hydrodistillation for natural aromatic essential oils (strawberry, orange,). Nanoemulsification yielded droplets of 145 ± 18 nm with a polydispersity index (PDI) of 0.18 ± 0.03, confirming a homogeneous distribution and kinetic stability over 30 days at 4 °C. Hedonic sensory evaluation conducted with 30 panelists revealed an overall appreciation score of 7.7/9, with a high purchase intent (26/30 panelists). From an entrepreneurial standpoint, the project targets the Algerian premium functional beverage market, estimated at over 2.5 million health-conscious consumers, with a projected break-even point between 18 and 24 months. These results validate the scientific and commercial feasibility of the concept and lay the groundwork for future industrial scale-up.

Keywords: functional energy drink, nanoemulsification, ultrasonication, caffeine-free, ginseng, matcha, L-theanine, stability, agri-food startup.

الملخص

يعرض هذا العمل صياغة وتطوير مشروب طاقة وظيفي طبيعي بالكامل، خالٍ من الكافيين والمحليات الصناعية، في إطار مشروع ناشئة جامعية. تعتمد التركيبة على تآزر مجموعة من المكونات الحيوية الفعالة تشمل الجنسنغ، وشاي الماتشا، و -Lثيانين، وفيتامينB12 ، وفيتامينC ، حيث تم تغليفها داخل مستحلب نانوي من نوع زيت في ماء، مثبت بليسيتين الصويا ،ومحضر باستخدام تقنية الموجات فوق الصوتية بالمسبار(20 كيلو هرتز).

تم استخلاص المركبات الفعالة بواسطة النقع البارد بالإيثانول، بينما استخُدمت تقنية التقطير المائي لاستخلاص الزيوت العطرية (الفراولة والبرتقال). وقد أتاحت تقنية الاستحلاب النانوي الحصول على قطرات بحجم 145 ± 18 نانومتر، مع مؤشر تعدد التشتت (PDI) قدره 18.0 ± 03.0، مما يؤكد تجانس التوزيع وثبات المستحلب حركيًا لمدة 30 يومًا عند درجة حرارة 4°م.

أظهر التقييم الحسي القائم على المقياس التفضيلي، والذي أجُري على 30 متذوقًا، درجة قبول إجمالية بلغت 9/7.7، مع نية شراء مرتفعة(26 من أصل 30 مشاركًا). ومن الناحية الريادية، يستهدف المشروع سوق المشروبات الوظيفية الفاخرة في الجزائر، والذي يقدُرَّ بأكثر من 5.2 مليون مستهلك مهتم بالصحة، مع توقع الوصول إلى نقطة التعادل المالي خلال فترة تتراوح بين 18 و24 شهرًا.

تؤكد هذه النتائج الجدوى العلمية والتجارية للمفهوم المقترح، كما تمثل أساسًا واعداً للتوسع المستقبلي نحو الإنتاج الصناعي على نطاق واسع .

الكلمات المفتاحية :مشروب طاقة وظيفي، الاستحلاب النانوي، الموجات فوق الصوتية، خالٍ من الكافيين، الجنسنغ، الماتشا، -Lثيانين، الثبات، ناشئة في الصناعات الغذائية.

Table de matière

Liste des abréviations 9

Liste des figures 10

Liste des tableaux 11

Partie bibliographique 12

Introduction 12

Chapitre 1 : Nanoémulsion 14

1. Généralités 15

2. Méthodes de préparation des nanoémulsions 16

2.1. Méthode à haute énergie 17

2.2. Méthodes à faible énergie 19

3. Caractérisation des nanoémulsions 22

4. Applications des nanoémulsions 23

5. Optimisation du système de nanoémulsion 25

1. Définition des boissons énergisantes 31

2. Composition des boissons énergisantes 31

2.1. Caféine 31

2.2. Taurine 32

2.3. Guarana 32

2.4. Ginseng 32

2.5. Complexe des vitamines B 32

2.6. Ginkgo biloba 33

2.7.L-carnitine 33

2.8. Sucres 33

3. Effet des boissons énergisantes 34

3.1. Effets sur le système cardiovasculaire 35

3.2. Effets sur le système neurologique 37

Santé mentale 38

3.3. Effets sur le système gastro-intestinal et rénal 39

3.4. Effets rénaux 40

3.5. Autres effets 40

4. Complications obstétricales.....40

Projet : Formulation et développement d'une boisson énergisante fonctionnelle sans caféine ni édulcorants artificiels : étude de stabilité par nanoémulsification 41

2. L'idée du projet.....42

2.1. D'où vient l'idée du projet ? 43

2.2. Type d'activité.....43

3. Valeurs suggérées du projet 44

4. Objectifs du projet.....45

5. Calendrier du projet.....45

5.1. Composition des produits.....45

5.2. Formulation 46

5.3. Analyses physicochimiques, nutritionnelles et colloïdales des boissons énergétiques fonctionnelle.....49

6. Prototypes.....53

7.L'aspect innovant.....53

8.Analyse du marché 55

8.1. Segmentation du marché cible 55

8.2. Analyse de la concurrence.....56

8.3. Opportunités du marché 56

8.4. Avantage concurrentiel du projet 56

9.Analyse SWOT 57

10.Modèle d'Affaires Canvas (BMC) 58

11. Plan d'organisation et de fonctionnement du projet 59

11.1 Organisation générale du projet 59

11.2 Mode de fonctionnement du projet 59

11.3 Organisation des ressources humaines 60

11.4 Système de gestion et de contrôle 60

12. Plan budgétaire 61

12.1 Estimation des coûts du projet 63

12.1.1 Estimation du montant total de l'investissement : (coût du projet).....63

12.1.2 Estimation des achats de matières premières du projet.....63

12.1.3 Estimation des coûts de la main-d'œuvre 64

12.1.4 Estimation des coûts externes du projet 65

12.1.5 Estimation des coûts d'amortissement des investissements.....65

13.Conclusion.....66

Références bibliographiques 67

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
BEF	Boisson énergisante fonctionnelle
BMC	Business Model Canvas
B2B	Business to Business
B2C	Business to Consumer
CNRC	Centre National du Registre du Commerce
DLS	Dynamic Light Scattering
ECAS	European Cardiac Arrhythmia Society
EFSA	Autorité européenne de sécurité des aliments
FED	Functional Energy Drink
FIFO	First In First Out
HACCP	Hazard Analysis and Critical Control Points
HPH	Homogénéisation haute pression
mL	Millilitre
Mg	Milligramme
Nm	Nanomètre
OMS	Organisation mondiale de la Santé
PDI	Polydispersity Index / Indice de polydispersité
RD	Recherche et développement
kHz	Kilohertz
kJ	Kilojoule

Liste des figures

Figure 1: (a) Nanoémulsion de type huile dans eau (H/E ou o/w) ; (b) nanoémulsion de type eau dans huile (E/H ou w/o). 15
Figure 2: gouttelette stabiliser par un tensioactif 17
Figure 3: formation d'une nanoémulsion par la méthode à haute énergie 18
Figure 4: méthode d'inversion des phases 22
Figure 5: Effets pathologiques des boissons énergisantes sur le tissu cardiaque 37
Figure 6: Effets pathologiques des boissons énergisantes sur les tissus cérébraux 38
Figure 7: Effets pathologiques des boissons énergisantes sur les tissus gastro-intestinaux et rénaux Effets digestifs 39
Figure 8: Schéma du procédé de fabrication de la boisson fonctionnelle 48
Figure 9: Potentiel zêta A et B 52
Figure 10 : Gamme des boissons énergétiques fonctionnelles naturelles à base de nanoémulsions bioactives 53

Liste des tableaux

Tableau 1: Composition de quelques boissons énergisantes commercialisées 34
Tableau 2: Type d'activité 43
Tableau 3: Composition des produits 46
Tableau 4: Analyses physicochimiques, nutritionnelles et colloïdales des boissons énergétiques fonctionnelles 49
Tableau 5: Caractéristiques physicochimiques, nutritionnelles et fonctionnelles des boissons énergisantes 50
Tableau 6: Analyse SWOT 57
Tableau 7: Modèle d'Affaires Canvas (BMC) 58
Tableau 8: Évaluation du montant global de l'investissement 63
Tableau 9: Estimation des achats de matières premières 63
Tableau 10: Estimation des coûts de la main-d'œuvre 64
Tableau 11: Coût annuel estimé de la main-d'œuvre 64
Tableau 12: Estimation des coûts externes du projet 65
Tableau 13: Estimation des coûts d'amortissement des investissements 65
Tableau 14: Estimation du volume des ventes annuelles 61
Tableau 15: Calcul du résultat annuel 62

Partie bibliographique

Introduction

Le rythme de vie moderne, caractérisé par une charge de travail croissante, un stress important et un besoin constant de performance, a favorisé l'essor du marché des boissons énergisantes. Ces produits sont largement consommés par les étudiants, les sportifs et les jeunes actifs dans le but d'améliorer la vigilance, la concentration et l'endurance physique. Toutefois, la majorité des boissons énergisantes disponibles sur le marché contiennent des quantités élevées de caféine, ainsi que des sucres ajoutés ou des édulcorants artificiels, dont la consommation excessive peut entraîner des effets néfastes sur la santé (Sugajski et al., 2023).

De nombreuses études ont rapporté que la consommation fréquente de boissons énergisantes est associée à divers effets indésirables, notamment une augmentation de la pression artérielle, des palpitations cardiaques, des troubles du rythme cardiaque, de l'anxiété, de l'irritabilité ainsi que des perturbations du sommeil. Par ailleurs, la présence de sucres en forte concentration ou d'édulcorants artificiels soulève également des préoccupations liées au risque de maladies métaboliques et cardiovasculaires. Face à ces constats, les consommateurs sont aujourd'hui à la recherche d'alternatives plus saines, plus naturelles et offrant des bénéfices fonctionnels sans compromettre leur bien-être (Wolk et al., 2012).

Dans ce contexte, la L-théanine apparaît comme un ingrédient particulièrement prometteur. Cet acide aminé naturellement présent dans les feuilles de thé (*Camellia sinensis*) est reconnu pour ses effets bénéfiques sur les fonctions cognitives. Contrairement à la caféine, la L-théanine favorise un état de relaxation et de vigilance calme, améliore la concentration et réduit le stress sans provoquer d'excitation excessive ni d'effets secondaires cardiovasculaires. Son utilisation dans une boisson fonctionnelle représente ainsi une approche innovante permettant de répondre aux attentes des consommateurs soucieux de leur santé (Shi, et al., 2026).

Cependant, l'incorporation de composés bioactifs dans une matrice alimentaire liquide constitue un défi technologique important. En effet, certains ingrédients fonctionnels présentent une faible solubilité, une sensibilité à l'oxydation ou une stabilité limitée au cours du stockage, ce qui peut réduire leur efficacité et altérer la qualité du produit final. Le développement d'une boisson fonctionnelle performante nécessite donc l'adoption de technologies capables d'assurer la protection et la stabilité de ces composés.

Afin de répondre à cette problématique, le présent projet de startup, intitulé **«**

Formulation et développement d'une boisson énergisante fonctionnelle sans caféine : étude de stabilité par nanoémulsification », propose le développement d'une boisson innovante à base de L-théanine et d'ingrédients naturels, associée à la technologie de nanoémulsification. La nanoémulsificaton constitue une approche technologique avancée permettant de produire des systèmes dispersés dont les gouttelettes sont de taille nanométrique.

Cette technologie présente plusieurs avantages majeurs, notamment l'amélioration de la stabilité physique de la formulation, la protection des composés bioactifs contre les phénomènes de dégradation et l'augmentation de leur biodisponibilité grâce à une meilleure dispersion et une plus grande surface d'échange. Ces propriétés font de la nanoémulsification une solution particulièrement adaptée au développement de boissons fonctionnelles innovantes(Safaya& Rotliwala, 2020).

L'originalité de ce projet réside ainsi dans la combinaison d'un actif naturel à effet neurocognitif, la L-théanine, avec une technologie de formulation innovante basée sur la nanoémulsification. Cette approche permet non seulement de proposer une alternative plus saine aux boissons énergisantes conventionnelles, mais également d'optimiser l'efficacité des composés fonctionnels grâce à une meilleure stabilité et une biodisponibilité accrue.

Au-delà de son intérêt scientifique et technologique, ce projet s'inscrit dans une démarche entrepreneuriale visant à répondre à une demande croissante du marché pour des produits naturels, fonctionnels et innovants. Il ambitionne ainsi de contribuer au développement d'une nouvelle génération de boissons énergisantes conciliant performance, sécurité sanitaire et innovation technologique.

Chapitre 1 : Nanoémulsion

1. Généralités

Les nanoémulsions ont gagné en popularité ces dernières années en raison de leur large champ d'application dans les domaines pharmaceutiques, des pesticides, des cosmétiques, de l'alimentation, des peintures et de l'environnement (Solans et al., 2005). Les nanoémulsions sont des systèmes cinétiquement stables, dont la taille des gouttelettes est de l'ordre de 100 nm, présentant une dispersion colloïdale multiphasique avec une durée de conservation prolongé (Meleson et al., 2004).

Grâce à leur très petite taille, elles améliorent la pénétration, l'étalement et la distribution uniforme sur la zone ciblée

Les nanoémulsions sont principalement classées en deux catégories : les émulsions huile-dans-eau (o/w), à base aqueuse, et les émulsions eau-dans-huile (w/o), à base huileuse, qui ont été largement étudiées. Une nanoémulsion est un mélange de deux liquides non miscibles stabilisés par un émulsifiant soluble dans la phase continue (Encyclopedia of Emulsion Technology, 1996 ; Robins et Fillery-Travis, 1989). Le choix entre une émulsion de type o/w ou w/o dépend de l'utilisation prévue dans un domaine d'application spécifique(figure 1). (Tadros et al., 2004).

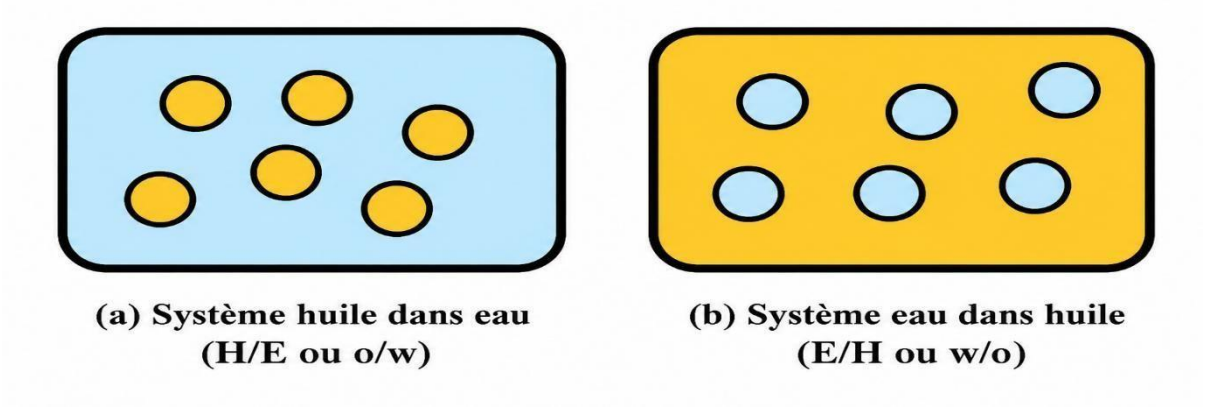


Figure 1 : (a) Nanoémulsion de type huile dans eau (H/E ou o/w) ; (b) nanoémulsion de type eau dans huile (E/H ou w/o).

L'émulsifiant utilisé est généralement un tensioactif, efficace pour la préparation des nanoémulsions. Les tensioactifs jouent un rôle majeur dans la déformation et la fragmentation des gouttelettes, tout en empêchant leur coalescence pendant l'émulsification. Ils sont classés selon leur équilibre hydrophile-lipophile (HLB). Comme le montre la Figure 2, lorsque des gouttelettes d'huile dispersées et recouvertes de tensioactifs se rapprochent les unes des autres, un mince film d'eau se forme entre elles. Les charges similaires présentes sur la couche de tensioactif entourant les gouttelettes d'huile se repoussent mutuellement. Ce phénomène

stabilise le film interfacial, empêche la rupture des gouttelettes et limite leur coalescence (Mason et al., 2006).

Les tensioactifs les plus efficaces sont les tensioactifs non ioniques, utilisés pour émulsifier aussi bien les systèmes huile-dans-eau que les systèmes eau-dans-huile (Fryd et Mason, 2012 ; Gupta et al., 2016). De nombreux travaux de recherche se sont concentrés sur la préparation de nanoémulsions par différentes méthodes, notamment les méthodes à haute énergie et les méthodes à faible énergie. Pour la formulation des nanoémulsions, la forte consommation énergétique constitue la principale contrainte des procédés tels que la microfluidisation, l'homogénéisation à haute pression (HPH) et l'ultrasonication (Singh et al., 2017).

À l'inverse, les méthodes à faible énergie, telles que la méthode de la température de transition de phase, l'inversion de phase par changement de composition, la dilution des microémulsions et la méthode d'émulsification en phase D, nécessitent beaucoup moins d'énergie pour la formulation des nanoémulsions (Yukuyama et al., 2018 ; Anjali et al., 2012).

Les propriétés des nanoémulsions formulées sont déterminées à l'aide de diverses techniques de caractérisation. Ces méthodes permettent d'analyser la taille et la forme des gouttelettes, les propriétés rhéologiques ainsi que les facteurs influençant la stabilité du système, tels que la conductivité, le pH et le potentiel zêta. Bien que les nanoémulsions soient cinétiquement stables, plusieurs mécanismes de déstabilisation, notamment la floculation, la coalescence, le mûrissement d'Ostwald et le crémage, peuvent conduire à une séparation de phases.

Parmi ces phénomènes, le mûrissement d'Ostwald doit être particulièrement contrôlé afin de limiter l'instabilité des nanoémulsions. Ce processus entraîne la formation de gouttelettes d'huile plus grosses à partir de gouttelettes plus petites au sein de la phase continue (Wooster et al., 2008 ; Buscall et al., 1979). L'influence de paramètres tels que la composition de la nanoémulsion et la température sur les taux de déstabilisation a également été largement étudiée (Setya et al., 2014).

2. Méthodes de préparation des nanoémulsions

La préparation des nanoémulsions peut être réalisée soit par des méthodes à **haute énergie**, soit par des méthodes à faible énergie. Ces deux approches diffèrent par la quantité d'énergie utilisée. Les méthodes à haute énergie emploient des dispositifs mécaniques capables de générer d'importantes forces de rupture. En revanche, les méthodes à faible énergie modifient les

propriétés physicochimiques du système afin de produire des particules de taille nanométrique **(Çinar, 2017)**.

Depuis le développement des nanoémulsions, les méthodes à haute énergie ont longtemps constitué le seul choix des chercheurs en raison de leur simplicité de mise en œuvre. Récemment, les méthodes à faible énergie ont suscité un intérêt croissant, notamment pour les formulations contenant des composés sensibles à la température, tels que les ingrédients pharmaceutiques **(Koroleva et Yurtov, 2012)**.

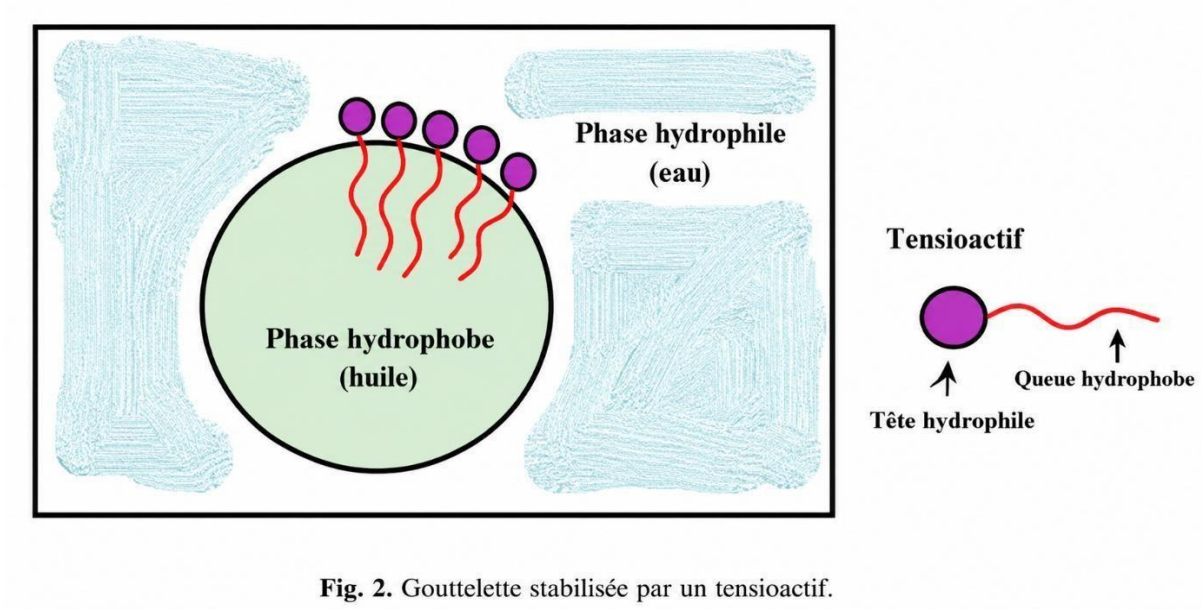


Fig. 2. Gouttelette stabilisée par un tensioactif.

Figure 2: gouttelette stabiliser par un tensioactif

2.1. Méthode à haute énergie

Les nanoémulsions préparées par des méthodes à haute énergie utilisent des dispositifs mécaniques tels que les microfluidiseurs, les homogénéisateurs à haute pression (HPH) et les ultrasonicateurs. Comme illustré à la Figure 3, ces équipements appliquent d'importantes forces de rupture afin de produire des nanogouttelettes (Anton, Benoit et Saulnier, 2008).

Ces techniques sont facilement transposables à l'échelle industrielle, mais elles nécessitent une consommation énergétique élevée, ce qui augmente les coûts de production. Leur principe de fonctionnement repose respectivement sur l'action d'un broyeur colloïdal, des ondes sonores à haute fréquence (≥ 20 kHz) et d'une pompe de déplacement à haute pression (500–50 000 psi) pour les microfluidiseurs, les ultrasonicateurs et les homogénéisateurs à haute pression. Des études ont montré que les homogénéisateurs à haute pression sont largement utilisés dans l'industrie alimentaire, car ils permettent de réduire la taille des gouttelettes d'une émulsion grossière préexistante en la faisant passer à travers une valve soumise à des forces de turbulence,

de cisaillement et de cavitation. Cela a conduit à la conception de différentes buses permettant d'obtenir les tailles de gouttelettes souhaitées. Dans cette méthode, l'augmentation de la pression d'homogénéisation entraîne une diminution de la taille des gouttelettes.

Les microfluidiseurs fonctionnent selon un principe similaire à celui des homogénéisateurs à haute pression, la principale différence résidant dans la conception des canaux d'écoulement. Les ultrasonicateurs, quant à eux, sont largement utilisés dans les laboratoires de recherche. Ils convertissent les ondes électriques en ondes de pression, ce qui entraîne une réduction de la taille des gouttelettes lorsque le temps de sonication, la puissance appliquée et la concentration en émulsifiant augmentent (McClements, 2011).

Les méthodes à haute énergie peuvent être utilisées avec pratiquement tous les types d'huiles pour préparer des nanoémulsions. Elles sont particulièrement adaptées aux huiles très visqueuses et de masse moléculaire élevée. Cette approche nécessite généralement une plus faible quantité de tensioactifs et facilite leur sélection.

Cependant, ces méthodes peuvent présenter des inconvénients pour les systèmes d'administration de médicaments contenant des substances thermosensibles, en raison de la chaleur générée au cours du procédé (Cmbebih, 2017).

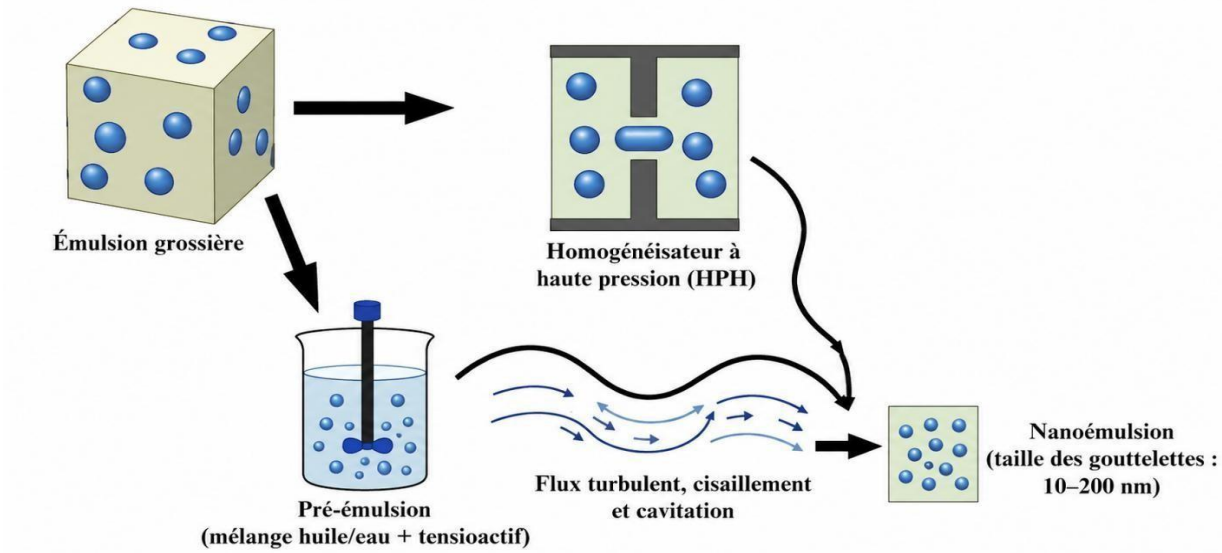


Fig. 3. Formation d'une nanoémulsion par la méthode à haute énergie (homogénéisation à haute pression).

Figure 3: formation d'une nanoémulsion par la méthode à haute énergie

2.2. Méthodes à faible énergie

Les nanoémulsions peuvent être préparées en utilisant l'énergie chimique interne du système (ou potentiel chimique des composants), ce qui est appelé méthode à faible énergie. L'énergie chimique libérée lors de l'émulsification est considérée comme le phénomène responsable de la formation des nanoémulsions par cette approche. Ce mécanisme résulte d'un changement de la courbure spontanée des molécules tensioactives, passant d'une courbure négative à positive (émulsion huile-dans-eau, H/E) ou de positive à négative (émulsion eau-dans-huile, E/H) (Jadhav et al., 2015).

Cette méthode comprend l'émulsification spontanée, l'inversion de phase par composition (PIC), l'inversion de phase par température (PIT), la dilution de microémulsion et l'émulsification en phase D. Les méthodes à faible énergie nécessitent généralement une simple agitation à faible vitesse (environ 1600 tr/min), ce qui réduit considérablement la consommation énergétique.

En principe, ces méthodes sont classées en méthodes isothermes et méthodes thermiques. Les méthodes isothermes sont particulièrement adaptées aux composés bioactifs thermosensibles (Anton et Vandamme, 2009). Elles incluent principalement l'émulsification spontanée, l'inversion de phase par composition, la dilution de microémulsion et l'émulsification en phase D. Les méthodes thermiques sont surtout utilisées pour les nanoparticules lipidiques solides, où un chauffage est nécessaire afin de maintenir les lipides à l'état liquide (Solans et Solé, 2012).

2.2.1. Émulsification spontanée

Cette méthode repose sur le déplacement des composants miscibles à l'eau, tels que le solvant, le tensioactif et le co-tensioactif, d'une phase organique vers une phase aqueuse.

Le procédé débute par l'ajout d'une phase organique contenant l'huile et le tensioactif dans une phase aqueuse composée d'eau et de co-tensioactif. La migration rapide des composants hydrosolubles vers la phase aqueuse provoque une forte turbulence à l'interface des deux phases, augmentant ainsi la surface interfaciale huile-eau (Lefebvre et al., 2017 ; Saberi et al., 2015 ; Komaiko et McClements, 2016).

Cette situation entraîne la formation spontanée de fines gouttelettes d'huile lors de la rupture de la phase microémulsionnaire bicontinue. L'utilisation de solvants peut favoriser ce processus, en présence ou en absence de tensioactifs. En l'absence de tensioactifs, ce phénomène est appelé effet Ouzo (Komaiko et McClements, 2016).

L'ordre de mélange des composants n'a pas montré d'effet critique sur le procédé, puisque les nanoémulsions se forment spontanément (Shafiq-un-Nabi et al., 2007).

2.2.2. Inversion de phase par composition (PIC)

L'inversion de phase par composition (PIC) constitue une forme avancée de l'émulsification spontanée. Cette méthode permet de produire des nanoémulsions à température ambiante sans recourir à des équipements énergivores, contrairement aux méthodes à haute énergie, ni à des solvants comme dans l'émulsification spontanée.

Une agitation est réalisée à l'aide d'un agitateur magnétique de laboratoire à température ambiante, tandis que l'eau est ajoutée goutte à goutte au mélange huile–tensioactif. L'augmentation progressive de la quantité d'eau conduit d'abord à la formation d'une nanoémulsion E/H, puis à une nanoémulsion H/E au point d'inversion de phase, sans consommation énergétique importante (Solé et al., 2010).

La formation de la nanoémulsion dépend de plusieurs paramètres : la tension interfaciale, la viscosité du milieu, la région de transition de phase, la structure du tensioactif et sa concentration. Cette méthode est également appelée inversion catastrophique, car elle implique une augmentation de la fraction volumique de la phase dispersée (Forgiarini et al., 2001).

2.2.3. Inversion de phase par température (PIT)

En 1969, Shinoda et Saito ont démontré que la température constitue le paramètre clé dans la formation des nanoémulsions H/E par la méthode PIT (Shinoda et Saito, 1969). L'année suivante, ces auteurs ont étudié les nanoémulsions E/H obtenues par cette méthode et ont souligné l'importance d'une longueur optimale de chaîne hydrophile pour obtenir des émulsions stables (Saito et Shinoda, 1970).

Quelques années plus tard, des travaux ont montré que la rapidité du changement de température joue également un rôle essentiel dans la formation des nanoémulsions E/H (Ozawa et al., 1997).

Dans cette méthode, le tensioactif, l'huile et l'eau sont mélangés puis chauffés progressivement jusqu'à atteindre la température d'inversion de phase. Le mélange est ensuite refroidi rapidement dans un bain de glace, ce qui conduit à la formation de nanoémulsions H/E. La stabilité des systèmes préparés par cette méthode est très sensible aux températures proches du PIT. Pour améliorer cette stabilité, des co-tensioactifs sont souvent ajoutés. L'utilisation de tensioactifs non ioniques, dont la géométrie moléculaire varie avec la température, permet également d'obtenir des nanoémulsions plus stables (Rao et McClements, 2010).

Dans certains cas, des sels inorganiques sont utilisés pour ajuster la température d'inversion de phase du système (Mei et al., 2011 ; Hasan et al., 2015). La solubilisation complète de la phase huileuse dans la microémulsion bicontinue conduit à la formation de nanoémulsions H/E présentant une faible taille de gouttelettes (Morales et al., 2003).

La méthode PIT présente généralement une efficacité d'émulsification plus élevée et un indice de polydispersité (PDI) plus faible que la méthode PIC (Jintapattanakit, 2018).

2.2.4. Dilution de microémulsion Cette technique est également connue sous le nom de méthode d'auto-émulsification.

La nanoémulsion est obtenue par dilution d'une microémulsion à température constante. Une microémulsion huile-dans-eau est rapidement diluée avec une grande quantité d'eau, ce qui réduit la concentration en tensioactif responsable de la stabilité thermodynamique du système. Cette méthode est facilement transposable à grande échelle. Elle présente une faible consommation énergétique puisqu'elle ne nécessite ni variation de température ni agitation à haute vitesse (Wang et al., 2007 ; Feng et al., 2018).

2.2.5. Émulsification en phase D (DPE)

La méthode d'émulsification en phase D (DPE) a été décrite pour la première fois par Sagitani et al. (1983). Depuis lors, peu d'études ont été consacrées à cette technique.

Comme les autres méthodes à faible énergie, le système de phase D comprend un tensioactif, de l'eau et une huile. Toutefois, il implique également l'utilisation d'un alkylpolyol comme composant supplémentaire pour former une nanoémulsion H/E.

Comparée aux autres méthodes à faible énergie, la DPE nécessite une faible concentration en tensioactif, aucune exigence stricte concernant l'équilibre hydrophile-lipophile (HLB), aucun mélange spécifique de tensioactifs, aucun solvant organique et une consommation énergétique encore plus faible que celle de la méthode PIC (Yukuyama et al., 2018 ; Kawanami et al., 2016 ; Sagitani et al., 1991).

En 2004, des chercheurs ont rapporté la préparation de nanoémulsions H/E par ajout d'une phase huileuse peu soluble à un mélange contenant huile, eau et tensioactif, conformément au principe de la méthode DPE (Tadros et al., 2004).

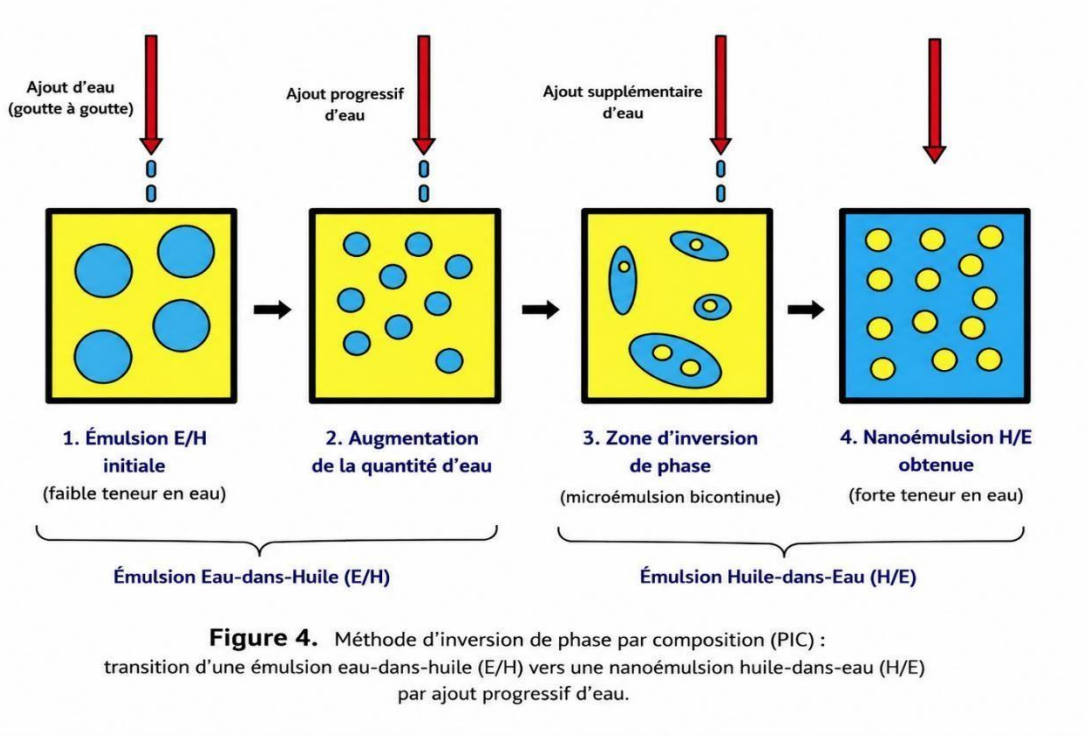


Figure 4. Méthode d'inversion de phase par composition (PIC) : transition d'une émulsion eau-dans-huile (E/H) vers une nanoémulsion huile-dans-eau (H/E) par ajout progressif d'eau.

Figure 4: méthode d'inversion des phases

3. Caractérisation des nanoémulsions

Les nanoémulsions présentent plusieurs propriétés caractéristiques, notamment une taille de gouttelettes nanométrique, une grande transparence, une viscosité variable et une stabilité élevée. Ces propriétés sont évaluées à l'aide de différentes méthodes analytiques telles que la diffusion dynamique de la lumière (DLS), la diffusion des neutrons aux petits angles (SANS), les mesures de viscosité, la microscopie à force atomique (AFM), le potentiel zêta et les tests de stabilité.

Pour déterminer la taille des gouttelettes des nanoémulsions, la DLS est considérée comme une méthode particulièrement utile. En mesurant l'évolution de la taille des gouttelettes au cours du temps à l'aide de cette technique, il est possible d'évaluer la stabilité physique de la nanoémulsion. La DLS a également été utilisée pour déterminer la vitesse de maturation d'Ostwald (Gupta et al., 2016).

Les longueurs d'onde des neutrons permettent de sonder des structures à l'échelle nanométrique, ce qui rend la méthode SANS particulièrement adaptée à l'étude de la structure globale des nanoémulsions (Graves et al., 2005).

À l'échelle macroscopique, des méthodes telles que les mesures de viscosité, de conductivité et les analyses diélectriques fournissent des informations pertinentes. Les nanoémulsions présentent généralement une faible viscosité lorsque la teneur en eau

augmente, tandis qu'une diminution de la concentration en tensioactif et en cotensioactif entraîne une augmentation de la viscosité. Les variations de viscosité permettent ainsi d'évaluer la stabilité des systèmes nanoémulsionnés.

Les tests de conductivité sont utilisés pour déterminer si les nanoémulsions formées sont de type huile dans eau (H/E ou o/w) ou eau dans huile (E/H ou w/o), ainsi que pour suivre les phénomènes d'inversion de phase (Chiesa et al., 2008).

Les mesures diélectriques permettent d'évaluer les caractéristiques structurelles et dynamiques des nanoémulsions. Quant à la microscopie à force atomique (AFM), elle est utilisée pour déterminer la forme des gouttelettes présentes dans le système nanoémulsionné.

La stabilité des nanoémulsions est étudiée à l'aide de plusieurs essais, notamment les tests de centrifugation, les cycles de congélation-décongélation, les essais de chauffage-refroidissement et les tests de stockage dans des conditions ambiantes. Ces analyses permettent de déterminer la durée pendant laquelle les nanoémulsions restent stables sans présenter de phénomènes de maturation d'Ostwald, de coalescence, de crémage ou de sédimentation. Elles fournissent ainsi une estimation de la durée de conservation du système préparé (Craig et al., 1995).

4. Applications des nanoémulsions

Au cours des dernières décennies, les nanoémulsions ont trouvé des applications importantes dans de nombreux secteurs. L'analyse de leur utilisation montre que les domaines pharmaceutique et cosmétique représentent la plus grande part des applications, suivis par l'industrie alimentaire et divers autres secteurs industriels (Maali et Mosavian, 2013). Dans le domaine agricole, les nanoémulsions sont utilisées comme systèmes de délivrance permettant une administration plus efficace des pesticides. Toutefois, leur exploitation commerciale reste limitée en raison de problèmes de stabilité. Une formulation nanoémulsionnée composée d'eau, de tensioactifs non ioniques et de décanoate de méthyle a été développée par inversion de phase pour la production du pesticide β-cyperméthrine (Wang et al., 2007).

De nombreuses études ont montré que les formulations orales à base de nanoémulsions présentent des avantages significatifs par rapport aux formulations conventionnelles. Jusqu'à

présent, le secteur pharmaceutique est celui qui a le plus bénéficié de cette technologie grâce aux propriétés particulières des médicaments nanoémulsionnés. Ces formulations permettent notamment de réduire la résistance aux médicaments, de diminuer les doses administrées et d'améliorer l'activité anticancéreuse (Gupta et al., 2016).

Pour le traitement de l'arthrite, une nanoémulsion lipidique huile dans eau contenant du diclofénac, préparée par homogénéisation à haute pression et présentant une taille de gouttelettes d'environ 200 nm, a été étudiée. L'administration orale de médicaments lipophiles tels que les antibiotiques, les hormones, les stéroïdes, les agents cytotoxiques, les diurétiques et les antifongiques bénéficie également de l'utilisation des nanoémulsions.

Certains chercheurs ont rapporté l'utilisation de la méthode d'inversion de phase par composition pour l'administration orale de protéines thérapeutiques telles que l'albumine sérique bovine (BSA). Cette approche a permis de préserver l'activité biologique et la structure conformationnelle de la BSA encapsulée. Une taille de gouttelettes de 21,8 nm a montré une efficacité élevée d'encapsulation du médicament (Sun et al., 2012).

L'application topique de certains médicaments sous forme de gels, crèmes ou patchs peut provoquer des irritations cutanées. Dans ce contexte, les nanoémulsions se sont révélées efficaces grâce à leur capacité à améliorer la pénétration cutanée en modifiant les bicouches lipidiques et en agissant comme de petits réservoirs de médicaments fonctionnant selon un gradient de concentration.

Des études ont également décrit la combinaison de méthodes à haute et basse énergie pour la formulation d'hydrogels nanoémulsionnés à base de lécithine de soja, de Tween et de poloxamère. La méthode d'émulsification spontanée a notamment été utilisée pour préparer une nanoémulsion de paclitaxel destinée au traitement du psoriasis par administration cutanée profonde (Khandavilli et Panchagnula, 2007).

Une autre étude a rapporté la formulation d'une nanoémulsion huile dans eau contenant de la caféine, présentant une taille de gouttelettes comprise entre 20 et 100 nm et obtenue par inversion de phase par composition (Sonneville-Aubrun et al., 2004).

Dans le secteur cosmétique, les nanoémulsions offrent d'excellentes propriétés sensorielles. Plusieurs travaux ont ainsi décrit des formulations stables élaborées à partir de différentes huiles ou mélanges d'huiles (Dasgupta et al., 2019 ; Chavda et Shah, 2017).

Les nanoémulsions sont également utilisées pour produire des revêtements comestibles destinés à prolonger la conservation des fruits et légumes. De nombreuses recherches portent sur la restructuration des matrices alimentaires grâce à cette technologie.

Les industries des produits de grande consommation (FMCG) exploitent les nanoémulsions pour réduire la teneur en matières grasses des crèmes glacées et assurer une fonte plus homogène des aliments surgelés (Sessa et al., 2015).

Des applications remarquables ont également été développées dans la fabrication de boissons, notamment les eaux enrichies et les boissons rafraîchissantes, en utilisant des méthodes à faible énergie. Les nanoémulsions contribuent ainsi à améliorer la durée de conservation des produits alimentaires.

Enfin, les nanoémulsions trouvent des applications dans le secteur industriel. Les émulsions bitumineuses restent stables pendant le stockage puis coalescent après leur application sur les routes pour former un film uniforme. Elles sont également utilisées pour faciliter l'élimination des marées noires en milieu marin ainsi que comme fluides de régénération (Gupta et al., 2016).

5. Optimisation du système de nanoémulsion

L'application à grande échelle des nanoémulsions nécessite une étude d'optimisation de différentes variables (principalement la composition, la vitesse d'agitation et la durée du procédé de formulation) afin d'obtenir les propriétés souhaitées des nanoémulsions formulées, notamment une taille minimale des gouttelettes ou une polydispersité minimale, une bonne stabilité et l'utilité spécifique recherchée (Gutiérrez et al., 2008).

L'effet du nombre de variables sur les propriétés des nanoémulsions semble constituer un domaine de recherche futur. Des variables telles que la composition et la technique de préparation ont été rapportées comme des outils d'optimisation pour contrôler la taille des gouttelettes. Afin d'obtenir les valeurs de mise à l'échelle des variables affectant la préparation des nanoémulsions, l'utilisation de plans d'expériences a été explorée.

L'optimisation expérimentale est particulièrement indiquée lorsque plusieurs variables influencent les propriétés des nanoémulsions. Le plan expérimental de Plackett-Burman, à l'aide du logiciel Minitab, a été rapporté pour déterminer l'influence de sept variables qualitatives indépendantes sur la préparation des nanoémulsions (Badawy et al., 2017 ; Solè et al., 2006).

Des études utilisant la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) basée sur le plan composite central (CCD) ont modifié l'approche traditionnelle consistant à maintenir toutes les variables constantes au cours de l'expérience (Hesseien et al., 2011 ; Taha et al., 2005). Ces études reposent sur l'hypothèse que toutes les variables sont indépendantes les unes des autres.

L'intensité du mélange a également été identifiée comme un paramètre clé dans la méthode PIC. Il est indiqué qu'une géométrie appropriée du récipient peut permettre d'atteindre le degré de mélange souhaité, conduisant ainsi au contrôle de la taille des gouttelettes (Zidan et al., 2007).

Outre les variables mentionnées ci-dessus, certains auteurs ont montré l'intérêt des études d'optimisation pour d'autres paramètres tels que l'influence de la dilution, la température d'analyse, le rapport massique tensioactif/huile (S/O), la température de préparation et la valeur HLB (Hydrophilic-Lipophilic Balance) (Shah et al., 2007 ; Chang et McClements, 2014).

L'analyse statistique impliquée dans la conception expérimentale montre clairement l'effet des variables sur la préparation des nanoémulsions (Du et al., 2016).

3. Caractérisation des nanoémulsions

Les nanoémulsions présentent plusieurs propriétés caractéristiques, notamment une taille de gouttelettes nanométrique, une grande transparence, une viscosité variable et une stabilité élevée. Ces propriétés sont évaluées à l'aide de différentes méthodes analytiques telles que la diffusion dynamique de la lumière (DLS), la diffusion des neutrons aux petits angles (SANS), les mesures de viscosité, la microscopie à force atomique (AFM), le potentiel zêta et les tests de stabilité.

Pour déterminer la taille des gouttelettes des nanoémulsions, la DLS est considérée comme une méthode particulièrement utile. En mesurant l'évolution de la taille des gouttelettes au cours du temps à l'aide de cette technique, il est possible d'évaluer la stabilité physique de la nanoémulsion. La DLS a également été utilisée pour déterminer la vitesse de maturation d'Ostwald (Gupta et al., 2016).

Les longueurs d'onde des neutrons permettent de sonder des structures à l'échelle nanométrique, ce qui rend la méthode SANS particulièrement adaptée à l'étude de la structure globale des nanoémulsions (Graves et al., 2005).

À l'échelle macroscopique, des méthodes telles que les mesures de viscosité, de conductivité et les analyses diélectriques fournissent des informations pertinentes. Les nanoémulsions

présentent généralement une faible viscosité lorsque la teneur en eau augmente, tandis qu'une diminution de la concentration en tensioactif et en co-tensioactif entraîne une augmentation de la viscosité. Les variations de viscosité permettent ainsi d'évaluer la stabilité des systèmes nanoémulsionnés.

Les tests de conductivité sont utilisés pour déterminer si les nanoémulsions formées sont de type huile dans eau (H/E ou o/w) ou eau dans huile (E/H ou w/o), ainsi que pour suivre les phénomènes d'inversion de phase (Chiesa et al., 2008).

Les mesures diélectriques permettent d'évaluer les caractéristiques structurelles et dynamiques des nanoémulsions. Quant à la microscopie à force atomique (AFM), elle est utilisée pour déterminer la forme des gouttelettes présentes dans le système nanoémulsionné.

La stabilité des nanoémulsions est étudiée à l'aide de plusieurs essais, notamment les tests de centrifugation, les cycles de congélation-décongélation, les essais de chauffage-refroidissement et les tests de stockage dans des conditions ambiantes. Ces analyses permettent de déterminer la durée pendant laquelle les nanoémulsions restent stables sans présenter de phénomènes de maturation d'Ostwald, de coalescence, de crémage ou de sédimentation. Elles fournissent ainsi une estimation de la durée de conservation du système préparé (Craig et al., 1995).

4. Applications des nanoémulsions

Au cours des dernières décennies, les nanoémulsions ont trouvé des applications importantes dans de nombreux secteurs. L'analyse de leur utilisation montre que les domaines pharmaceutique et cosmétique représentent la plus grande part des applications, suivis par l'industrie alimentaire et divers autres secteurs industriels (Maali et Mosavian, 2013).

Dans le domaine agricole, les nanoémulsions sont utilisées comme systèmes de délivrance permettant une administration plus efficace des pesticides. Toutefois, leur exploitation commerciale reste limitée en raison de problèmes de stabilité. Une formulation nanoémulsionnée composée d'eau, de tensioactifs non ioniques et de décanoate de méthyle a été développée par inversion de phase pour la production du pesticide β-cyperméthrine (Wang et al., 2007).

De nombreuses études ont montré que les formulations orales à base de nanoémulsions présentent des avantages significatifs par rapport aux formulations conventionnelles. Jusqu'à présent, le secteur pharmaceutique est celui qui a le plus bénéficié de cette technologie grâce aux propriétés particulières des médicaments nanoémulsionnés. Ces formulations permettent

notamment de réduire la résistance aux médicaments, de diminuer les doses administrées et d'améliorer l'activité anticancéreuse (Gupta et al., 2016).

Pour le traitement de l'arthrite, une nanoémulsion lipidique huile dans eau contenant du diclofénac, préparée par homogénéisation à haute pression et présentant une taille de gouttelettes d'environ 200 nm, a été étudiée. L'administration orale de médicaments lipophiles tels que les antibiotiques, les hormones, les stéroïdes, les agents cytotoxiques, les diurétiques et les antifongiques bénéficie également de l'utilisation des nanoémulsions.

Certains chercheurs ont rapporté l'utilisation de la méthode d'inversion de phase par composition pour l'administration orale de protéines thérapeutiques telles que l'albumine sérique bovine (BSA). Cette approche a permis de préserver l'activité biologique et la structure conformationnelle de la BSA encapsulée. Une taille de gouttelettes de 21,8 nm a montré une efficacité élevée d'encapsulation du médicament (Sun et al., 2012).

L'application topique de certains médicaments sous forme de gels, crèmes ou patchs peut provoquer des irritations cutanées. Dans ce contexte, les nanoémulsions se sont révélées efficaces grâce à leur capacité à améliorer la pénétration cutanée en modifiant les bicouches lipidiques et en agissant comme de petits réservoirs de médicaments fonctionnant selon un gradient de concentration.

Des études ont également décrit la combinaison de méthodes à haute et basse énergie pour la formulation d'hydrogels nanoémulsionnés à base de lécithine de soja, de Tween et de poloxamère. La méthode d'émulsification spontanée a notamment été utilisée pour préparer une nanoémulsion de paclitaxel destinée au traitement du psoriasis par administration cutanée profonde (Khandavilli et Panchagnula, 2007).

Une autre étude a rapporté la formulation d'une nanoémulsion huile dans eau contenant de la caféine, présentant une taille de gouttelettes comprise entre 20 et 100 nm et obtenue par inversion de phase par composition (Sonneville-Aubrun et al., 2004).

Dans le secteur cosmétique, les nanoémulsions offrent d'excellentes propriétés sensorielles. Plusieurs travaux ont ainsi décrit des formulations stables élaborées à partir de différentes huiles ou mélanges d'huiles (Dasgupta et al., 2019 ; Chavda et Shah, 2017).

Les nanoémulsions sont également utilisées pour produire des revêtements comestibles destinés à prolonger la conservation des fruits et légumes. De nombreuses recherches portent sur la restructuration des matrices alimentaires grâce à cette technologie.

Les industries des produits de grande consommation (FMCG) exploitent les nanoémulsions pour réduire la teneur en matières grasses des crèmes glacées et assurer une fonte plus homogène des aliments surgelés (Sessa et al., 2015).

Des applications remarquables ont également été développées dans la fabrication de boissons, notamment les eaux enrichies et les boissons rafraîchissantes, en utilisant des méthodes à faible énergie. Les nanoémulsions contribuent ainsi à améliorer la durée de conservation des produits alimentaires.

Enfin, les nanoémulsions trouvent des applications dans le secteur industriel. Les émulsions bitumineuses restent stables pendant le stockage puis coalescent après leur application sur les routes pour former un film uniforme. Elles sont également utilisées pour faciliter l'élimination des marées noires en milieu marin ainsi que comme fluides de régénération (Gupta et al., 2016).

Chapitre 2 : Boissons énergisantes

Chapitre 2 : Boissons énergisantes

1. Définition des boissons énergisantes

Les boissons énergisantes sont des boissons non alcoolisées formulées pour augmenter temporairement le niveau d'énergie, la vigilance, la concentration et les performances physiques ou mentales. Elles contiennent généralement de fortes concentrations de caféine, associées à d'autres ingrédients bioactifs tels que la taurine, le guarana, le ginseng, la Lcarnitine, des vitamines du groupe B et des sucres.

Selon l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA), les boissons énergisantes sont des boissons contenant de la caféine, souvent associée à d'autres substances stimulant le métabolisme ou le système nerveux central. Leur consommation vise principalement à réduire la sensation de fatigue et à améliorer les capacités cognitives et physiques.

D'après Sugajski et al. (2023), les boissons énergisantes se distinguent des boissons rafraîchissantes classiques par leur teneur élevée en caféine et en substances stimulantes. Bien qu'elles puissent procurer un effet ergogène à court terme, une consommation excessive ou régulière peut être associée à des effets indésirables cardiovasculaires, neurologiques, métaboliques et rénaux.

2. Composition des boissons énergisantes

Les boissons énergisantes contiennent principalement de la caféine, associée à d'autres composés bioactifs tels que la taurine, le guarana et le ginseng, afin de produire un effet stimulant. L'Organisation mondiale de la Santé (OMS) recommande une teneur maximale de 80 mg de caféine pour 250 mL. Cependant, la concentration varie selon les produits et certaines analyses ont montré que la teneur réelle en caféine pouvait dépasser d'environ 20 % celle indiquée sur l'étiquette (Tableau 1). La composition des boissons énergisantes selon Sugajski et al (2023) est :

2.1. Caféine

La caféine est le principal ingrédient actif des boissons énergisantes. À des doses comprises entre 3 et 5 mg/kg de poids corporel, elle améliore les performances cognitives, la vigilance et la concentration. Toutefois, une consommation excessive peut entraîner des effets indésirables tels que l'anxiété, l'insomnie, l'augmentation de la pression artérielle, les palpitations cardiaques et les troubles gastro-intestinaux. Une consommation régulière et élevée est également associée à des perturbations du sommeil chez les adolescents et à un risque accru de troubles mentaux.

2.2. Taurine

La taurine est un acide aminé soufré naturellement produit à partir de la méthionine et de la cystéine. Dans les boissons énergisantes, elle est généralement obtenue par synthèse chimique. Elle joue plusieurs rôles physiologiques importants, notamment la détoxification, la stabilisation des membranes cellulaires, l'osmorégulation et le maintien de l'homéostasie du calcium intracellulaire. La taurine est également utilisée dans la prise en charge de certaines maladies cardiovasculaires, neurologiques et métaboliques. Une canette de 300 mL peut contenir environ 1 g de taurine, une quantité considérée comme sûre et potentiellement bénéfique lorsqu'elle est consommée de manière modérée.

2.3. Guarana

Le guarana (*Paullinia cupana)* est une plante originaire du Brésil et de la région amazonienne. Ses graines sont particulièrement riches en guaranine, un alcaloïde dont les propriétés sont similaires à celles de la caféine et dont la concentration peut être supérieure à celle retrouvée dans les grains de café. Le guarana possède également une forte activité antioxydantes grâce à sa richesse en polyphénols, notamment les tanins. Il contribue à limiter l'oxydation lipidique, à améliorer l'élasticité vasculaire et à réduire l'inflammation. Il contient également de la théobromine et de la théophylline, deux alcaloïdes aux effets stimulants qui participent à l'effet énergisant et peuvent contribuer à la réduction de l'appétit.

2.4. Ginseng

Le ginseng est reconnu pour ses propriétés thérapeutiques et ses effets bénéfiques sur la santé. Des études récentes ont montré que certains ginsénosides, notamment Rb1, Rg1, Rg3, Re et Rd, présentent une activité pharmacologique plus importante que la plante entière. Grâce à leurs propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires et cytoprotectrices, ces composés contribuent à la protection des systèmes nerveux et cardiovasculaire. Le ginsénoside Rb1 inhibe notamment la prolifération des cellules endothéliales vasculaires humaines et réduit les effets néfastes de l'homocystéine, un facteur impliqué dans l'athérosclérose et la formation de caillots sanguins, diminuant ainsi le risque de maladies cardiovasculaires.

2.5. Complexe des vitamines B

Les boissons énergisantes sont fréquemment enrichies en vitamines du groupe B, notamment les vitamines B1, B2, B3, B5, B6, B7, B9 et B12. Ces vitamines hydrosolubles participent au métabolisme énergétique en favorisant la production et la dégradation des glucides, lipides et protéines. Certaines vitamines, comme la niacine (B3) et l'acide

pantothénique (B5), contribuent à l'amélioration des performances mentales et à la réduction de la fatigue. Une boisson énergisante de 45 kcal peut contenir environ 40 mg de niacine (B3), 10 mg d'acide pantothénique (B5), 10 mg de pyridoxine (B6) et 10 µg de cyanocobalamine (B12). La riboflavine (B2) est également ajoutée, souvent sous forme de phosphate sodique de riboflavine, qui présente une meilleure biodisponibilité que la forme pure, bien qu'elle puisse provoquer des réactions allergiques chez certaines personnes. Les recommandations nutritionnelles indiquent qu'un adulte ne devrait pas dépasser 100 mg de vitamines B par jour.

2.6. Ginkgo biloba

Le Ginkgo biloba, ou arbre aux quarante écus, est utilisé depuis des siècles pour ses propriétés médicinales. Les extraits obtenus à partir des feuilles séchées sont traditionnellement employés dans le traitement de l'asthme et de la bronchite. Une consommation comprise entre 120 et 600 mg d'extrait de Ginkgo biloba peut améliorer les fonctions cognitives et les réflexes. Ses effets bénéfiques sont principalement attribués à son importante activité antioxydante

2.7.L-carnitine

La L-carnitine est un acide aminé synthétisé à partir de la méthionine et de la lysine. Son rôle principal est de favoriser le transport des acides gras vers les mitochondries afin de produire de l'énergie lors de l'effort physique. Elle est fréquemment ajoutée aux boissons énergisantes pour améliorer l'endurance et soutenir le métabolisme lipidique. Chez les adultes en bonne santé, des doses comprises entre 0,25 et 2 g par jour sont généralement considérées comme sûres. Toutefois, son utilisation est déconseillée chez les personnes souffrant d'insuffisance rénale ou sous dialyse **(Sugajski et al., 2023).**

2.8. Sucres

Les boissons énergisantes contiennent généralement des quantités importantes de sucres ajoutés. Par exemple, une canette de 250 mL peut contenir 50 à 60 g de sucre, soit l'équivalent de 10 à 12 cuillères à café. Une consommation excessive et prolongée de sucres favorise le développement de l'obésité, du diabète de type 2 et de l'insulinorésistance. L'exposition chronique à des concentrations élevées de glucose peut altérer la fonction des cellules β du pancréas, réduire la sécrétion d'insuline et entraîner une augmentation persistante de la glycémie

Tableau 1: Composition de quelques boissons énergisantes commercialisées

Ingrédient	Monster (500 mL)	Red Bull (250 mL)	Burn (250 mL)	Tiger (250 mL)	NGine (250 mL)	Max Force (250 mL)	Black (250 mL)
Glucides (g)	12	11	13,3	10,9	10,8	10,9	10,8
Sodium (g)	0,08	0,04	0,02	0,07	0,10	0,10	0,10
Riboflavine (B2) (mg)	0,7	—	—	—	—	—	—
Acide pantothénique (B5) (mg)	—	2	1,5	2	1,98	2	1,98
Niacine (B3) (mg)	8,5	8	6,5	7	7	6,4	7
Vitamine B6 (mg)	0,8	2	0,3	1,4	1,4	0,56	1,4
Vitamine B12 (µg)	2,5	2	0,38	0,5	0,5	0,5	0,5
Taurine (mg)	400	400	400	400	400	400	400
Ginseng (mg)	82	—	—	—	—	—	—
L-carnitine (mg)	42	—	—	—	—	—	—
Caféine (mg)	32	32	32	32	32	30	32
Valeur énergétique (kJ)	203	192	242	197	196	198	195

3. Effet des boissons énergisantes

La consommation des boissons énergisantes a augmenté ces dernières années pour plusieurs raisons. L'un des principaux facteurs est le marketing agressif et la promotion intensive de ces boissons par les entreprises du secteur des boissons, ciblant principalement les jeunes adultes et les adolescents. Cette stratégie marketing met souvent en avant les effets énergisants et stimulants des boissons énergisantes ainsi que leur association avec les sports extrêmes et d'autres activités à forte dépense énergétique.

Une autre raison de l'augmentation de leur consommation est la croyance selon laquelle elles peuvent améliorer les performances cognitives et physiques. De nombreuses personnes consomment des boissons énergisantes pour accroître leur niveau d'énergie, améliorer leur concentration et leur vigilance, et optimiser leurs performances sportives. Cependant, bien que ces boissons puissent procurer certains bénéfices à court terme dans ces domaines, leurs effets

à long terme sur la santé et les performances restent encore mal connus **(Gutiérrez-Hellín et Varillas-Delgado, 2021)**.

Enfin, la disponibilité croissante des boissons énergisantes dans les supermarchés, les stationsservice et d'autres points de vente a également

contribué à leur popularité. Elles sont souvent présentées comme une source pratique et facilement transportable d'énergie et de stimulation, ce qui en fait un choix privilégié pour les personnes ayant un mode de vie actif ou effectuant de nombreux déplacements. Toutefois, cette accessibilité facilite également leur consommation excessive, ce qui peut accroître le risque d'effets indésirables.

La principale substance psychoactive présente dans les boissons énergisantes est la caféine.

Elles contiennent également d'autres ingrédients supposés augmenter l'énergie et la vigilance mentale, tels que la taurine, le guarana, le ginseng, diverses vitamines et d'autres composés **(Wolk et al., 2012)**.

Les effets de ces boissons sur l'organisme humain ne sont pas encore totalement élucidés, ce qui explique l'intérêt croissant de la recherche scientifique pour l'étude de leurs effets négatifs potentiels. **(Gutiérrez-Hellín et Varillas-Delgado, 2021)**

3.1. Effets sur le système cardiovasculaire

Les effets sur le système cardiovasculaire semblent être les plus étudiés parmi tous les effets indésirables de ces substances, en raison de leur potentiel de gravité pouvant aller jusqu'au décès. La Société Européenne des Arythmies Cardiaques (European Cardiac Arrhythmia Society, ECAS) a réalisé une analyse critique des données publiées concernant les boissons énergisantes, notamment les événements cardiovasculaires et leur éventuelle relation de cause à effet, afin de formuler des recommandations pour une consommation plus sûre de ces boissons (**Lévy et al., 2019**).

Une consommation élevée de boissons énergisantes est associée à un état hémodynamique et adrénergique aigu (**Schüttler et al., 2022**), caractérisé par une augmentation des concentrations de glucose et de noradrénaline. Chez des patients jeunes et par ailleurs en bonne santé, plusieurs complications cardiovasculaires ont été rapportées, notamment des arythmies supraventriculaires et ventriculaires, des vasospasmes coronariens, une ischémie ou un infarctus du myocarde, une fibrillation auriculaire, des syncopes, une dissection aortique, une cardiomyopathie, un arrêt cardiaque et une mort subite d'origine cardiaque (figure 5) (**Ehlers et al., 2019 ; Wikoff et al., 2017 ; Mangi et al., 2017 ; Protano et al., 2023**).

Les données disponibles montrent que le risque d'événements cardiovasculaires est plus élevé chez les individus présentant une maladie cardiaque structurelle ou héréditaire préexistante. De plus, la consommation de ces boissons peut conduire au diagnostic de pathologies cardiaques jusque-là méconnues par les consommateurs (FIGURE 5).

Des effets cardiovasculaires indésirables ont également été observés lors de l'association avec d'autres substances, notamment l'alcool. La caféine exerce des effets chronotropes positifs (augmentation de la fréquence cardiaque) et inotropes positifs (augmentation de la force de contraction du cœur) (**Cappelletti et al., 2018**). À faibles concentrations, ces effets résultent principalement d'une augmentation de la libération des catécholamines (adrénaline et noradrénaline) due à l'antagonisme des récepteurs présynaptiques de l'adénosine.

À des concentrations plus élevées (> 10 µM), la caféine augmente directement l'entrée du calcium dans les cellules en favorisant l'augmentation de l'AMP cyclique, conséquence de l'inhibition de la phosphodiestérase. À des concentrations très élevées (> 100 µM), elle réduit la séquestration du calcium par le réticulum sarcoplasmique. À fortes doses, elle provoque une contraction des muscles lisses vasculaires, à l'exception des vaisseaux cérébraux.

La consommation habituelle de café tend à augmenter légèrement la résistance vasculaire périphérique ainsi que la pression artérielle, probablement en raison de la libération de catécholamines. Une augmentation de la pression artérielle systolique de 0,8 mmHg et de la pression diastolique de 0,5 mmHg est observée pour chaque 100 mg de caféine consommés. Chez les personnes particulièrement sensibles, la consommation de quelques tasses de café peut provoquer des arythmies cardiaques. Toutefois, chez la majorité des individus, l'administration de fortes doses de caféine entraîne principalement une tachycardie. La stimulation des récepteurs cardiaques à la ryanodine de type 2 (RyR2), associée à l'inhibition de la phosphodiestérase, produit un effet stimulant sur le cœur. Cependant, à fortes doses, ces mécanismes peuvent induire des arythmies, une tachycardie et une fibrillation ventriculaire. La capacité de la caféine à provoquer des arythmies chez les individus présentant des troubles de la conduction auriculo-ventriculaire ou des foyers ectopiques n'a toutefois pas été démontrée de manière concluante (**Frost et al., 2004**). L'effet inotrope de la caféine est renforcé par l'effet chronotrope positif du guarana, qui contient de la caféine, de la théobromine et de la théophylline.

Comme mentionné précédemment, neuf cas d'arrêt cardiaque associés à la consommation de fortes doses de ces stimulants ont été rapportés dans la littérature scientifique (**Mangi et al., 2017 ; Ehlers et al., 2019**). Le principal mécanisme déclencheur semble être l'apparition d'arythmies cardiaques, telles que la fibrillation ventriculaire, ou la révélation de canalopathies cardiaques jusque-là non diagnostiquées.

Parmi ces neuf cas, six patients ont nécessité une réanimation cardio-pulmonaire intensive et aucune anomalie cardiaque n'a été détectée lors des suivis effectués dans les mois suivants. En revanche, les trois autres patients sont décédés (arrêt cardiaque soudain, infarctus du myocarde avec sus-décalage du segment ST (STEMI) ou fibrillation ventriculaire). Cependant, aucune donnée d'autopsie concernant ces trois cas n'a été retrouvée dans la littérature scientifique disponible.

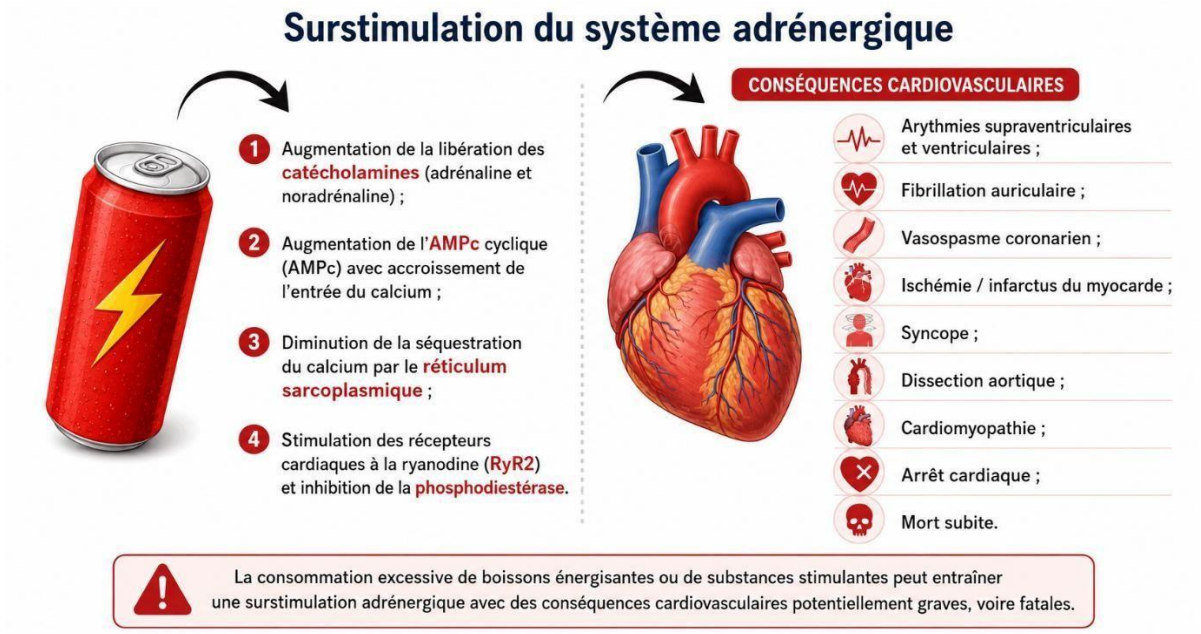


Figure 5: Effets pathologiques des boissons énergisantes sur le tissu cardiaque

3.2. Effets sur le système neurologique

Les boissons énergisantes contenant de fortes quantités de caféine et d'autres substances stimulantes peuvent affecter le système nerveux central. Elles sont associées à des convulsions, des vasculopathies cérébrales et des épisodes de psychose maniaque. La stimulation excessive du système adrénergique peut entraîner une hyperglycémie, une hypokaliémie, une leucocytose et une acidose métabolique. À des doses inférieures à 500 mg, la caféine augmente la vigilance, accélère les processus cognitifs et réduit la fatigue. À des doses plus élevées, elle peut provoquer

agitation, anxiété, insomnie, tremblements et crises convulsives sévères (**Morgan et Sethi, 2005**). La consommation de boissons énergisantes a également été associée à des crises épileptiques chez des individus avec ou sans antécédents d'épilepsie(figure 6) (**Epilepsy Foundation, 2023**).

La caféine agit principalement en bloquant les récepteurs de l'adénosine A1 et A2A, ce qui favorise la transmission dopaminergique et la libération de neurotransmetteurs. Ces mécanismes expliquent ses propriétés psychoactives et stimulantes. Des polymorphismes génétiques du récepteur A2A pourraient influencer la consommation habituelle de caféine chez l'être humain (**Rossi et al., 2010 ; Herrick et al., 2009 ; Persad, 2011**).

Santé mentale

Selon **Richards et al. (2016)**, les effets aigus des boissons énergisantes peuvent améliorer temporairement l'humeur, mais une consommation chronique est associée à une augmentation du stress, de l'anxiété et de la dépression. La taurine, qui traverse la barrière hématoencéphalique, agit sur les récepteurs GABA et glycine et exerce un effet anticonvulsivant ainsi qu'un rôle stabilisateur des membranes cellulaires (**Richards et al., 2016**).

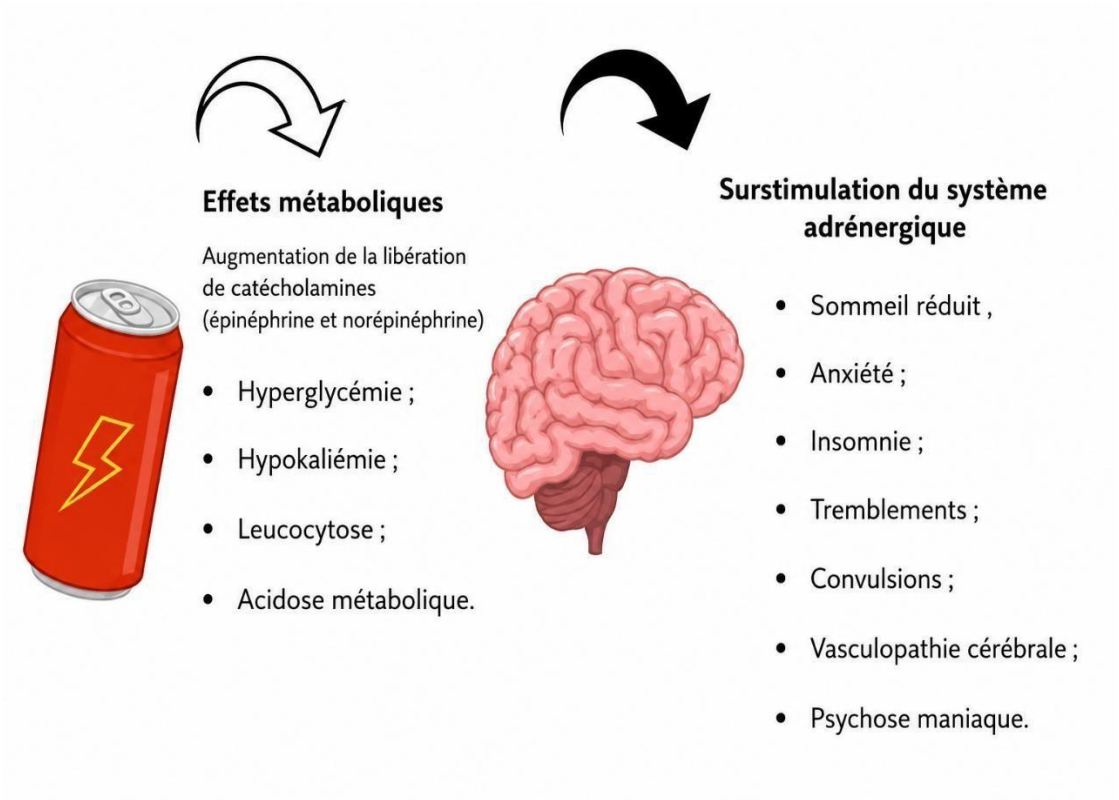


Figure 6: Effets pathologiques des boissons énergisantes sur les tissus cérébraux

3.3. Effets sur le système gastro-intestinal et rénal

La consommation de boissons énergisantes a été associée à plusieurs troubles gastro-intestinaux et rénaux, notamment l'hépatite aiguë, la pancréatite aiguë et l'insuffisance rénale aiguë. La niacine (vitamine B3), présente dans certaines formulations, peut provoquer une hépatotoxicité dose-dépendante se manifestant par une augmentation des enzymes hépatiques (ALT/AST), une stéatose hépatique, une nécrose hépatique ou, dans de rares cas, une insuffisance hépatique. La dose minimale rapportée comme hépatotoxique est de 1 g/jour (**Rizkallah et al., 2005**). La taurine pourrait également contribuer au développement de lésions rénales aiguës (Figure7) (**Rizkallah et al., 2005**).

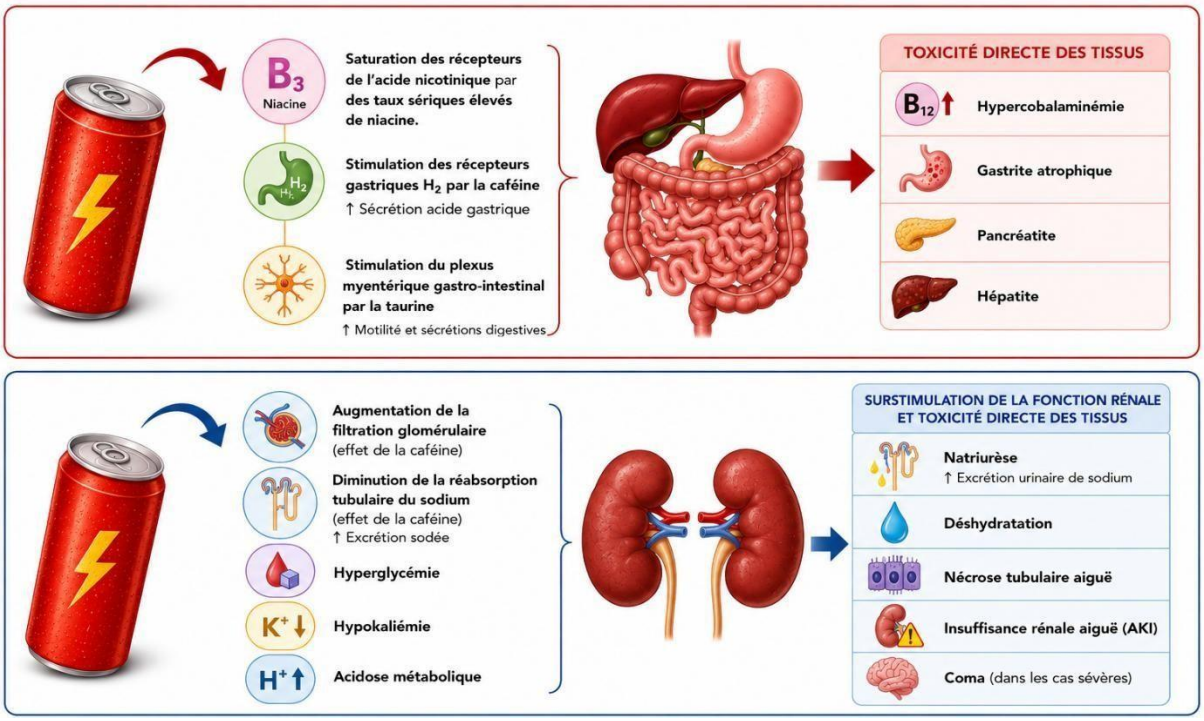


Figure 7: Effets pathologiques des boissons énergisantes sur les tissus gastro-intestinaux et rénaux Effets digestifs

La caféine stimule la sécrétion salivaire et gastrique, favorisant ainsi la digestion. Elle relâche également le sphincter gastro-œsophagien, ce qui peut favoriser le reflux gastro-œsophagien. La taurine est présente dans les cellules pariétales gastriques et dans le système nerveux entérique, où elle participe à la régulation de la motilité gastro-intestinale et des fonctions endocrines digestives (**Huang et al., 2011**).

3.4. Effets rénaux

La caféine possède un effet diurétique modéré, lié à une augmentation de la filtration glomérulaire et à une diminution de la réabsorption tubulaire du sodium (**Huang et al., 2011**). Ces effets peuvent contribuer à des déséquilibres hydro-électrolytiques chez les consommateurs excessifs de boissons énergisantes.

3.5. Autres effets

Complications dermatologiques et auto-immunes

Des cas rares de réactions cutanées et de complications auto-immunes ont été rapportés.

Certains auteurs suggèrent l'existence de mécanismes d'hypersensibilité liés à la taurine synthétique ou à certains additifs présents dans les boissons énergisantes, tels que les sulfites, le butylhydroxyanisole (BHA), le butylhydroxytoluène (BHT) et les polysorbates (**Meng et al., 2012**).

4. Complications obstétricales

Quelques complications obstétricales isolées ont été décrites dans la littérature, notamment des cas d'hyperinsulinisme néonatal lié à une consommation maternelle excessive de sucres et de ménorragies associées à une carence acquise en vitamine K. Cependant, les données disponibles restent limitées et aucun lien causal clair avec les ingrédients des boissons énergisantes n'a été établi à ce jour.

Projet : Formulation et développement d'une boisson énergisante fonctionnelle sans caféine ni édulcorants artificiels : étude de stabilité par nanoémulsification

Projet : Formulation et développement d'une boisson énergisante fonctionnelle sans caféine ni édulcorants artificiels : étude de stabilité par nanoémulsification 1**. Nom de l'équipe :** ***Alpha +***

L'encadreur : Dr Laib Imen Étudiants de Master 2 :

Laouira Abderrahmene

Tabet Abderrahim

Meliani Amin

Mohamed Elhachimi Abdellahi Deh

Meksen Bechir Islam



2. L'idée du projet

Ce projet porte sur **le développement d'une boisson énergétique fonctionnelle innovante, 100 % naturelle, formulée à partir de matrices fruitées enrichies en composés bioactifs d'origine végétale. L'innovation principale** repose sur l'intégration d'une technologie avancée de **nanoémulsification** assistée, permettant l'encapsulation simultanée de composés hydrophiles et lipophiles (L-théanine, extraits de ginseng, polyphénols, vitamines, huiles essentielles) sous forme de gouttelettes nanométriques de diamètre inférieur à 200 nm.

Cette structuration à l'échelle nanométrique augmente significativement la surface interfaciale, améliorant ainsi la solubilisation, la biodisponibilité et l'efficacité d'absorption des composés actifs. Elle confère également une stabilité thermodynamique et cinétique élevée au système colloïdal, tout en limitant les phénomènes d'instabilité physicochimique tels que la coalescence, le crémage, la floculation et la séparation de phases. Par ailleurs, cette approche permet d'optimiser les propriétés organoleptiques du produit, notamment la texture, la fluidité et l'aspect visuel, améliorant ainsi son acceptabilité sensorielle.

Sur le plan fonctionnel, la formulation est conçue pour assurer une libération énergétique progressive et durable, associée à une modulation positive des fonctions neurocognitives, incluant la vigilance, la concentration et la réduction de la fatigue mentale. L'effet synergique entre la L-théanine, les polyphénols végétaux et les vitamines induit un état de vigilance calme, sans recours à la caféine ni aux édulcorants artificiels, réduisant ainsi les effets secondaires associés aux boissons énergétiques conventionnelles.

Le produit résultant est considéré comme **une nouvelle génération de boisson énergétique**, **fondée sur une stimulation douce, durable et physiologiquement mieux tolérée.**

2.1. D'où vient l'idée du projet ?

2.2. Type d'activité

Dans le cadre de la structuration administrative et économique du projet, l'activité est définie conformément à la nomenclature du Centre National du Registre du Commerce (CNRC), en lien avec le secteur agroalimentaire et les activités de recherche et développement appliquées aux aliments fonctionnels innovants (Tableau 2)

Tableau 2: Type d'activité

Code d'activité (conformément à la nomenclature CNRC)*	**Secteur d'activité**	**Détermination de l'activité**
11.07 (ou code CNRC équivalent : fabrication de boissons non alcoolisées)	Industrie agroalimentaire	Formulation, développement et production de boissons fonctionnelles énergisantes non alcoolisées, sans caféine et sans édulcorants artificiels, enrichies en composés bioactifs naturels et stabilisées par nanoémulsification.
72.19 (R&D en sciences appliquées / agroalimentaire)	Recherche & développement /	Recherche, optimisation et développement de systèmes colloïdaux (nanoémulsions) appliqués aux matrices
	industrie agroalimentaire	alimentaires fonctionnelles, incluant l'étude de la stabilité physicochimique et microbiologique.

Le projet s'inscrit dans le secteur agroalimentaire, plus précisément dans le développement de boissons fonctionnelles destinées à la consommation humaine. À ce titre, il est soumis au respect strict de la réglementation en vigueur et aux exigences suivantes **:**

- **Autorisation sanitaire et contrôle de conformité des produits alimentaires, délivrés par les autorités compétentes, notamment :** ○ Le Ministère du Commerce (contrôle de la qualité et répression des fraudes), ○ Les services déconcentrés de la Direction du Commerce (contrôle de la qualité et de la répression des fraudes),
  - ○ Le Ministère de la Santé (hygiène et sécurité sanitaire des denrées alimentaires).
- Respect des normes d'hygiène et de fabrication des denrées alimentaires, incluant l'application des Bonnes Pratiques de Fabrication (BPF) ainsi que la mise en place d'un système HACCP garantissant la maîtrise des risques sanitaires tout au long de la chaîne de production.

- Conformité des ingrédients et additifs alimentaires utilisés, conformément à la réglementation algérienne en vigueur, avec recours exclusif à des substances autorisées et absence d'édulcorants artificiels ainsi que de tout additif prohibé.
- Contrôle de la sécurité et de la stabilité du produit fini, incluant l'évaluation de la stabilité des nanoémulsions et la réalisation d'analyses physicochimiques, microbiologiques et, le cas échéant, toxicologiques, conformément aux normes nationales et internationales applicables.

3. Valeurs suggérées du projet

Le projet repose sur un ensemble de valeurs fondamentales qui orientent sa conception, son développement et son positionnement sur le marché :

- **Naturalité et clean label :** utilisation exclusive d'ingrédients naturels d'origine végétale, sans caféine ajoutée ni édulcorants artificiels, garantissant un produit sain et transparent pour le consommateur.
- **Innovation scientifique et technologique :** intégration de la nanoémulsification assistée comme technologie clé pour améliorer la biodisponibilité, la stabilité et l'efficacité des composés bioactifs.
- **Santé et bien-être :** développement d'une boisson fonctionnelle visant à améliorer la vigilance, la concentration et la réduction de la fatigue mentale, tout en limitant les effets secondaires des boissons énergétiques classiques.
- **Sécurité et qualité alimentaire :** respect strict des normes d'hygiène, des BPF et du système HACCP, garantissant un produit sûr et conforme aux exigences réglementaires.
- **Durabilité et responsabilité :** valorisation des ressources végétales naturelles et limitation des additifs synthétiques, dans une logique de production respectueuse de l'environnement et de la santé humaine.
- **Performance fonctionnelle :** conception d'un produit assurant une libération énergétique progressive et durable grâce à la synergie des composés bioactifs.

4. Objectifs du projet

Le projet vise à concevoir et développer une boisson énergétique fonctionnelle innovante, naturelle et technologiquement avancée, en répondant à des objectifs scientifiques, technologiques et nutritionnels clairement définis :

- **Développer une formulation innovante et naturelle :** concevoir une boisson 100 % naturelle à base de matrices fruitées enrichies en composés bioactifs végétaux, dans une approche clean label sans caféine ni additifs artificiels.
- **Optimiser la biodisponibilité des composés actifs :** utiliser la nanoémulsification assistée pour améliorer la solubilité, l'absorption et l'efficacité physiologique des molécules fonctionnelles (L-théanine, ginseng, polyphénols, vitamines).
- **Améliorer la stabilité physicochimique du produit :** garantir une stabilité thermodynamique et cinétique élevée, en limitant les phénomènes d'instabilité tels que la coalescence, le crémage et la séparation de phases.
- **Optimiser les propriétés organoleptiques :** améliorer la texture, la fluidité et l'aspect visuel afin de renforcer l'acceptabilité sensorielle du produit final.
- **Assurer un effet fonctionnel ciblé :** développer une boisson favorisant une énergie progressive et durable, avec amélioration de la vigilance, de la concentration et réduction de la fatigue mentale.
- **Proposer une alternative saine aux boissons énergétiques conventionnelles :** réduire les effets secondaires liés aux formulations riches en caféine et en sucres, en proposant une stimulation douce et physiologiquement mieux tolérée.

5. Calendrier du projet

5.1. Composition des produits

Le présent projet s'inscrit dans une démarche de recherche appliquée orientée vers le développement d'une boisson fonctionnelle énergisante innovante, formulée à partir d'extraits végétaux standardisés, de jus naturels et d'huiles essentielles d'agrumes, ainsi que de Lthéanine en tant que composé rétroactif d'intérêt. L'approche adoptée repose sur une stratégie de valorisation des métabolites secondaires issus de matrices végétales, combinée à des procédés d'extraction doux et à une technologie de formulation stable de type émulsion fine.

Le développement expérimental est assuré par une équipe composée d'étudiants en agroalimentaire et qualité des produits, sous la supervision d'un encadrant scientifique.

L'ensemble du procédé est conçu pour une production à l'échelle laboratoire (1 L), en vue d'une transposition ultérieure à l'échelle pilote (Tableau 3).

Tableau 3: Composition des produits

Produit	Nom commercial	Ingrédients (%)	Raison de choix / sélection des ingrédients
Boisson énergisante fraise	ALPHA+ FRAISE 	Eau distillée (64,99 %) ; Jus de fraise (25 %) ; Extrait de ginseng (0,30 %) ; Extrait de matcha (0,30 %) ; Lthéanine (0,02 %) ; Vitamine C (0,05 %) ; Vitamine E (0,003 %) ; Vitamine B1 (0,0005 %) ; Vitamine B2 (0,0005 %) ; Vitamine B6 (0,0007 %) ; Vitamine B12 (<0,001 %) ; Stevia (1 %) ; sucre de coco (2 %) ; Lécithine de soja (0,05 %) ; Huiles essentielles (0,20 %) ; Extraits des écorces de fraises (6,08 %)	La formulation repose sur une synergie fonctionnelle entre composés adaptogènes, antioxydants, neuroactifs et vitamines du métabolisme énergétique. Le ginseng (*Panax ginseng*) contient des ginsénosides modulant l'axe hypothalamus-hypophyso-surrénalien et contribuant à la réduction de la fatigue physiologique (Zhou *et al.,* 2024). Le matcha (*Camellia sinensis*) apporte des catéchines (EGCG) à forte activité antioxydantes (Tang et al., 2021). La L-théanine favorise la vigilance relaxée (Kelly *et al.,* 2008). Les vitamines B1, B2, B6 et B12 participent au métabolisme énergétique normal, à la production d'ATP et au fonctionnement du système nerveux (Shavlovskaya& Bokova, 2023). La vitamine C agit comme cofacteur enzymatique dans les réactions d'oxydoréduction tandis que la vitamine E protège les membranes cellulaires contre le stress oxydatif (Kaźmierczak-Barańska et al., 2020 ; You *and al.,* 2024). Le jus de fraise constitue une matrice riche en anthocyanes renforçant le potentiel antioxydant global de la boisson (Dzhanfezova *et al.,* 2020).
Boisson énergisante orange	ALPHA+ ORANGE 	Eau distillée (64,99 %) ; Jus d'orange (25 %) ; Extrait de ginseng (0,30 %) ; Extrait de matcha (0,30 %) ; Lthéanine (0,02 %) ; Vitamine C (0,05 %) ; Vitamine E (0,003 %) ; Vitamine B1 (0,0005 %) ; Vitamine B2 (0,0005 %) ; Vitamine B6 (0,0007 %) ; Vitamine B12 (<0,001 %) ; Stevia (1 %) ; sucre de coco (2 %) ; Lécithine de soja (0,05 %) ; Huiles essentielles (0,20 %) ; Extraits des écorces des oranges (6,08 %)	Le jus d'orange est retenu pour sa richesse en vitamine C et en flavanones (naringénine), contribuant à l'amélioration du statut antioxydant (Miles. & Calder, 2021). Le système fonctionnel ginseng–matcha exerce une action synergique sur la réduction de la fatigue mentale et l'amélioration des performances cognitives. La Lthéanine optimise l'attention tout en limitant l'hyperstimulation. Les vitamines B1, B2, B6 et B12 soutiennent le métabolisme énergétique, la fonction neurologique et la réduction de la fatigue. La vitamine E agit en synergie avec la vitamine C pour protéger les constituants cellulaires contre l'oxydation. La lécithine de soja assure la stabilisation colloïdale des composés lipophiles et favorise l'efficacité de la nanoemulsion, améliorant ainsi la biodisponibilité des composés bioactifs (Uchida *et al.,* 2024 ; Zeng *et al.,* 2024)

5.2. Formulation

Le procédé de formulation des boissons énergétiques fonctionnelles repose sur une approche biotechnologique intégrée visant la valorisation des métabolites secondaires bioactifs issus de

matrices végétales sélectionnées (ginseng, *Camellia sinensis* (matcha), fraise et écorces d'agrumes). Les composés photochimiques sont extraits par macération hydro-éthanolique (24 h) sous agitation intermittente, suivie d'une séparation solide-liquide par filtration et d'une concentration sous vide à l'aide d'un évaporateur rotatif, permettant la préservation des composés thermolabiles et oxydables (Laib et *al*.,2023). Les huiles essentielles des écorces d'orange sont obtenues par hydrodistillation de type Clevenger, conduisant à l'extraction des fractions volatiles majoritairement terpéniques. Les jus de fruits sont préparés par pressage mécanique à froid, limitant les phénomènes d'oxydation enzymatique et la dégradation des composés bioactifs sensibles. La formulation finale repose sur une architecture biphasique associant une phase aqueuse riche en composés hydrosolubles (vitamines, sucres et extraits standardisés) et une phase lipidique constituée d'huiles essentielles émulsionnées à l'aide de lécithine de soja. L'homogénéisation est assurée par sonication à haute fréquence (20 kHz), favorisant la réduction de la taille des gouttelettes et la formation d'un système colloïdal de type nanoemulsion. Le produit final est ensuite filtré sur membrane (0,45 µm) et conditionné en bouteilles ambrées, afin de limiter les phénomènes de photo-oxydation et d'assurer la stabilité microbiologique et colloïdale durant le stockage à 4 °C (figure 8)

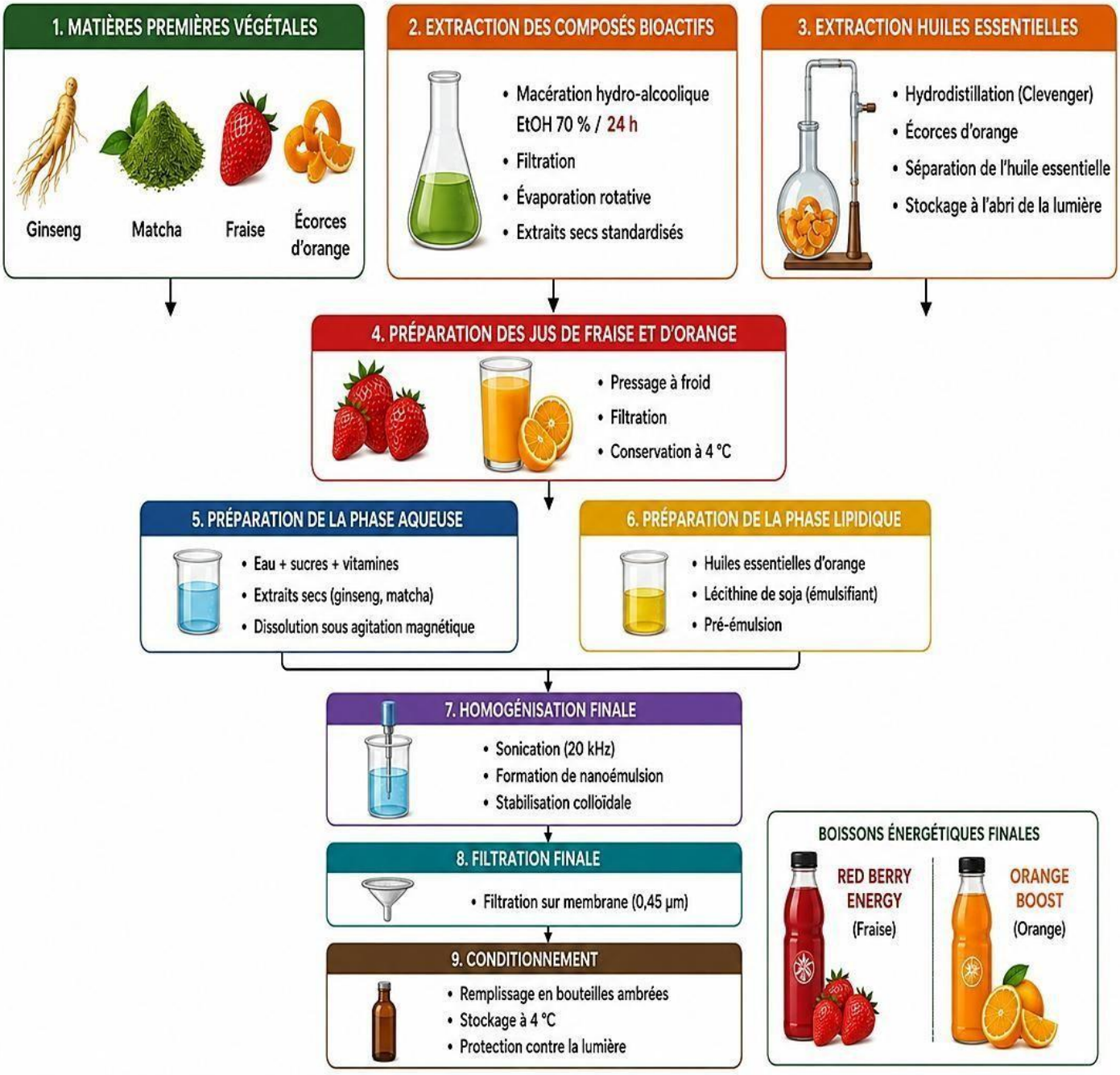


Figure 8: Schéma du procédé de fabrication de la boisson fonctionnelle

5.3. Analyses physicochimiques, nutritionnelles et colloïdales des boissons énergétiques fonctionnelle

Les différentes analyses physicochimiques, nutritionnelles et colloïdales réalisées pour la caractérisation des boissons énergétiques fonctionnelles sont présentées dans le Tableau 4.

Tableau 4: Analyses physicochimiques, nutritionnelles et colloïdales des boissons énergétiques fonctionnelles

Paramètre analysé	Techniques d'analyse	Raison scientifique de l'analyse	Méthodologie appliquée
pH	pH-mètre	Évaluation de l'acidité globale influençant la stabilité microbiologique, la solubilité des composés bioactifs et la perception sensorielle	Mesure réalisée à 25 ± 1 °C sur échantillon homogénéisé, après étalonnage du pH-mètre (Andersen & Menong, , 2025)
Conductivité	Conductimétrie	Estimation de la charge ionique (acides organiques, minéraux) influençant la stabilité physicochimique	Mesure directe sur échantillon filtré (0,45 µm) à température contrôlée (25 °C), après calibration de la sonde conductimétrique (Jensen, & Thirstrup, 2014)
Degré Brix (°Bx)	Réfractométrie	Quantification des solides solubles (principalement sucres) et estimation indirecte de la douceur et de la densité énergétique	Dépôt de 2–3 gouttes d'échantillon filtré sur prisme calibré, lecture directe corrigée à 20 °C(Kedenburg et al., 2012)
Sucres totaux	Méthode phénol–acide sulfurique ou DNS	Quantification des glucides totaux pour évaluation de la valeur énergétique réelle	Hydrolyse acide légère, puis réaction colorimétrique et lecture spectrophotométrique à 490 nm (phénol–H_2SO_4) ou 540 nm (DNS)
Protéines	Méthode de Kjeldahl ou Bradford	Détermination de la fraction azotée issue des extraits végétaux	Kjeldahl : digestion H_2SO_4 + distillation ammoniacale + titrage. Bradford : complexation Coomassie Blue et lecture à 595 nm
Lipides	Extraction Soxhlet / Folch	Quantification des lipides totaux contribuant à la valeur énergétique et à la stabilité oxydative	Extraction par solvant organique (hexane ou chloroforme/méthanol), évaporation du solvant et pesée gravimétrique du résidu lipidique
Valeur énergétique	Calcul Atwater	Estimation de l'apport calorique global de la boisson	Calcul basé sur les facteurs énergétiques standards : glucides (4 kcal/g), protéines (4 kcal/g), lipides (9 kcal/g)
Viscosité	Viscosimètre rotationnelle	Évaluation du comportement rhéologique et de la texture	Mesure effectuée à 25 °C avec vitesse de rotation contrôlée (spindle adapté), après homogénéisation de l'échantillon
Densité	Pycnométrie ou densimètre numérique	Contrôle de la reproductibilité et de la concentration globale du système	Mesure masse/volume à température constante (25 °C) après élimination des bulles d'air
Stabilité colloïdale	Centrifugation accélérée + turbidimétrie	Évaluation de la résistance à la séparation de phases (crémage, sédimentation)	Centrifugation (3000–5000 rpm, 15–30 min) suivie de mesure de turbidité et observation macroscopique
Potentiel zêta	Analyse électrophorétique (DLS)	Évaluation de la stabilité électrostatique des systèmes dispersés	Dilution contrôlée dans eau ultra-pure, injection dans cellule capillaire et mesure de mobilité électrophorétique

Activité de l'eau (aw)	Aw-mètre	Évaluation du risque microbiologique et de la stabilité de conservation	Mesure directe sur échantillon équilibré thermiquement à 25 °C dans chambre fermée
Analyse sensorielle	Test hédonique (échelle 9 points)	Évaluation de l'acceptabilité globale du produit	Panel non entraîné, conditions standardisées (température, codage des échantillons, randomisation)

Les résultats des analyses physicochimiques, nutritionnelles et de stabilité colloïdale des boissons formulées sont regroupés dans le Tableau 5.

Tableau 5: Caractéristiques physicochimiques, nutritionnelles et fonctionnelles des boissons énergisantes

Paramètre	**ALPHA+ FRAISE**	**ALPHA+ ORANGE**
pH	3,92 ± 0,03	3,68 ± 0,04
Conductivité électrique (ms/cm)	2,45 ± 0,08	2,90 ± 0,10
Degré Brix (°Bx)	6,8 ± 0,2	7,4 ± 0,2
Sucres totaux (g/100 mL)	3,8 ± 0,2	4,3 ± 0,2
Protéines (g/100 mL)	0,12 ± 0,01	0,10 ± 0,01
Lipides (g/100 mL)	0,03 ± 0,01	0,03 ± 0,01
Valeur énergétique (kcal/100 mL)	17,8 ± 0,5	19,6 ± 0,6
Viscosité (mPa·s)	3,60 ± 0,15	3,30 ± 0,12
Densité (g/cm³)	1,024 ± 0,002	1,028 ± 0,002
Stabilité colloïdale (%)	96,8 ± 0,5	97,2 ± 0,4
Activité de l'eau (aw)	0,973 ± 0,002	0,975 ± 0,003
Activité antioxydantes DPPH (%)	86,5 ± 1,7	80,8 ± 1,5
Acceptabilité sensorielle (/9)	7,7/9	7,7/9

Les boissons énergisantes développées présentent des caractéristiques physicochimiques globalement cohérentes avec des systèmes fonctionnels à base de fruits enrichis en composés bioactifs. Les valeurs de pH acide (3,68–3,92) assurent une stabilité physicochimique satisfaisante tout en contribuant à la préservation des vitamines et des composés phénoliques (Skąpska et *al.*, 2020). Les degrés Brix modérés, associés à une teneur contrôlée en sucres totaux, traduisent une formulation à faible charge glucidique intégrant du stevia et du sucre de

coco, permettant de réduire la densité énergétique tout en maintenant une bonne acceptabilité sensorielle (Sievenpiper et *al*., 2025).

Les faibles teneurs en lipides et protéines sont caractéristiques des matrices liquides fruitées, avec une contribution limitée des agents émulsifiants et des extraits végétaux (Grau-Fuentes et *al*., 2023). Les valeurs élevées de stabilité colloïdale (>96 %) confirment l'efficacité du système de nanoémulsion dans la prévention des phénomènes d'instabilité physique tels que la sédimentation ou le crémage. De plus, les faibles viscosités mesurées garantissent une texture fluide et agréable à la consommation (Mohammed *et al.*, 2020).

L'activité antioxydantes élevée (>80 % DPPH) met en évidence l'effet synergique des polyphénols, flavonoïdes, vitamines et extraits végétaux (ginseng, matcha), contribuant à une forte capacité de neutralisation des radicaux libres (Qiu, 2025). Enfin, les scores sensoriels élevés (>8/9) traduisent une forte acceptabilité globale, résultant d'un équilibre optimal entre acidité, douceur et profil aromatique, renforçant ainsi le potentiel de valorisation industrielle de ces boissons fonctionnelles innovantes.

Potentiel zêta

Les valeurs de potentiel zêtas mesurées sont de −28,7 ± 0,8 mV pour **ALPHA+ FRAISE A** et de −29,6 ± 0,7 mV pour **ALPHA+ ORANGE B** (Figure 9).

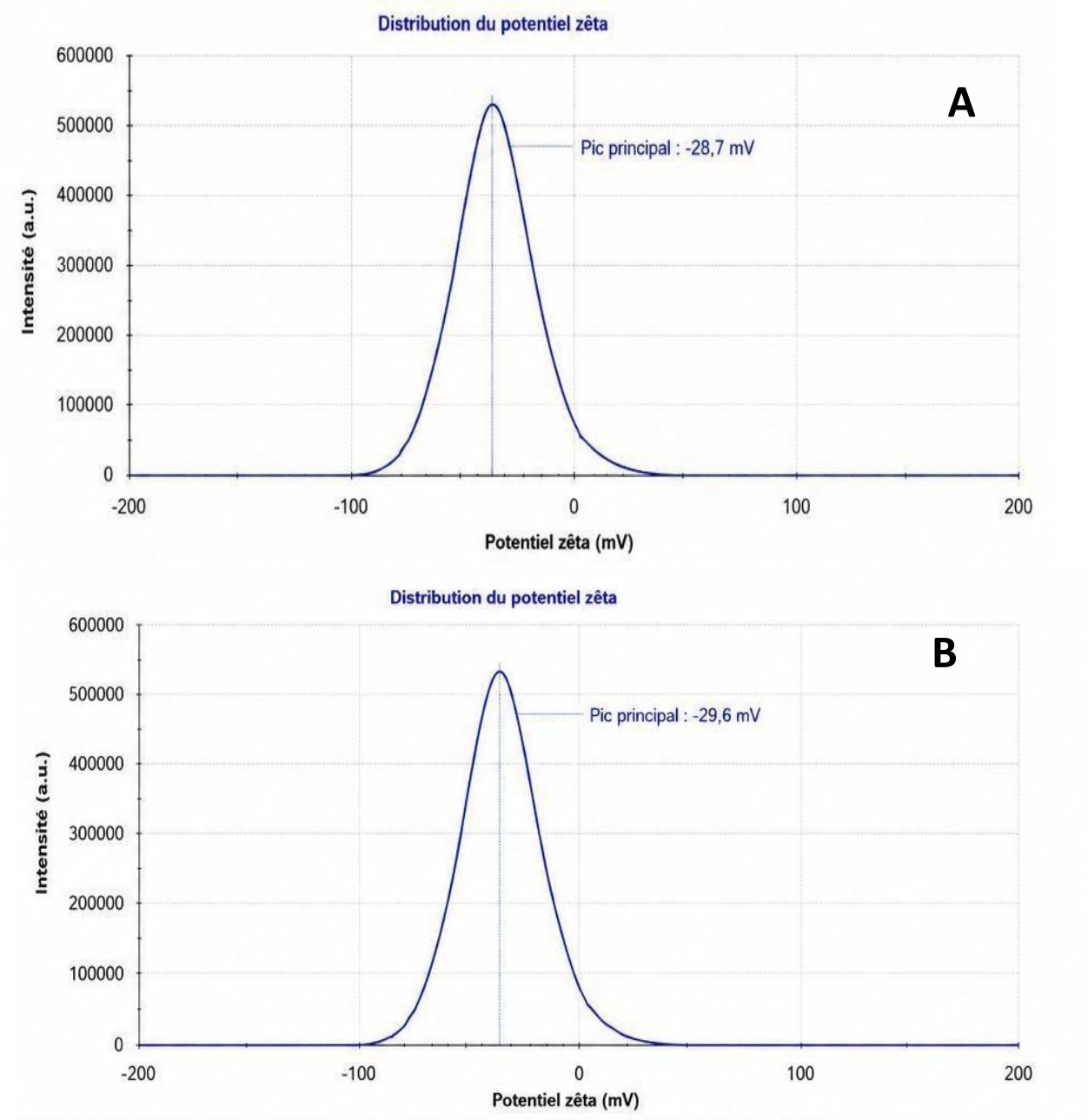


Figure 9: Potentiel zêta A et B

Ces résultats indiquent une charge de surface modérément élevée, assurant une répulsion électrostatique suffisante entre les gouttelettes dispersées. Bien que légèrement inférieures au seuil de ±30 mV généralement associé à une stabilité colloïdale élevée, ces valeurs restent compatibles avec une bonne stabilité physique des systèmes émulsionnés complexes. La valeur légèrement plus négative observée pour **ALPHA+ ORANGE** suggère une stabilité électrostatique marginalement supérieure, probablement liée à la composition ionique et matricielle du jus d'orange (Qayum *et al.*, 2024).

6. Prototypes

Deux formulations principales sont développées, chacune reposant sur une base de jus de fruits 100 % naturels et une combinaison spécifique de composés fonctionnels (Figure 5) :

- **ALPHA+ ORANGE :** jus d'orange, stevia, sucre de coco huile essentielle d'orange, extrait de ginseng, extrait de thé vert (matcha décaféiner), L-théanine, lécithine de soja (agent émulsifiant naturel), vitamine B12, vitamine C et acide citrique.
- **ALPHA+ FRAISE :** jus de fraise, stevia (faible index glycémique), sucre de coco extrait de ginseng, extrait de thé vert, L-théanine, lécithine de soja, vitamine B12, vitamine C et acide citrique (Figure 11).



Figure 10/ Gamme des boissons énergétiques fonctionnelles naturelles à base de nanoémulsions bioactives

7.L'aspect innovant

L'innovation de ce produit repose sur la combinaison synergique d'ingrédients bioactifs naturels et d'une technologie avancée de nanoémulsification, permettant de développer une nouvelle génération de boissons énergétiques fonctionnelles. Contrairement aux boissons

énergétiques conventionnelles, dont l'effet repose principalement sur des doses élevées de caféine, de sucres et d'additifs artificiels, cette formulation privilégie une approche physiologique plus douce et durable basée sur des composés bioactifs d'origine végétale.

L'élément technologique central réside dans l'utilisation de la nanoémulsification assistée pour encapsuler et disperser des molécules hydrophiles et lipophiles (L-théanine, extraits de ginseng, polyphénols, vitamines et huiles essentielles) sous forme de gouttelettes nanométriques inférieures à 200 nm. Cette structuration permet d'augmenter considérablement la surface interfaciale, améliorant ainsi la solubilité, la biodisponibilité et l'efficacité d'absorption des principes actifs tout en renforçant la stabilité physicochimique du produit.

L'innovation réside également dans l'association de molécules neurofonctionnelles naturelles, notamment la L-théanine et le ginseng, capables d'améliorer la vigilance, la concentration et les performances cognitives sans provoquer les effets indésirables généralement associés à la caféine. Cette synergie favorise une libération progressive de l'énergie et un état de vigilance calme et prolongé.

Enfin, le produit adopte une approche clean label, fondée sur l'utilisation de jus naturels et d'ingrédients d'origine végétale, sans caféine ajoutée, sans édulcorants artificiels et sans additifs controversés. Cette combinaison entre innovation technologique, nutrition fonctionnelle et naturalité confère au produit un positionnement unique sur le marché des boissons énergétiques, répondant aux attentes actuelles des consommateurs en matière de santé, de performance et de sécurité alimentaire.

Principaux éléments innovants :

- Utilisation de la nanoémulsification assistée pour améliorer la biodisponibilité et la stabilité des composés bioactifs.
- Encapsulation simultanée de composés hydrophiles et lipophiles dans un même système fonctionnel.
- Association innovante de L-théanine, ginseng, polyphénols et vitamines à visée neurofonctionnelle.
- Libération énergétique progressive sans recours à la caféine.
- Formulation 100 % naturelle et clean label. • Amélioration des propriétés sensorielles et de la stabilité physicochimique du produit.
- Alternative saine, durable et technologiquement avancée aux boissons énergétiques conventionnelles.

8.Analyse du marché

Le marché algérien des boissons énergétiques connaît une croissance progressive, portée par l'évolution des habitudes de consommation, l'urbanisation croissante et l'augmentation de la demande en produits favorisant la performance physique et mentale. Les consommateurs, en particulier les jeunes, les étudiants, les sportifs et les professionnels, recherchent de plus en plus des solutions permettant d'améliorer leur concentration, leur vigilance et leur niveau d'énergie au quotidien.

Cependant, le marché est actuellement dominé par des boissons énergétiques conventionnelles importées ou produites localement sous licence, dont les formulations reposent principalement sur la caféine, le sucre, les taurines synthétiques et divers additifs alimentaires. La consommation régulière de ces produits suscite des préoccupations croissantes liées à leurs effets potentiels sur la santé, notamment les troubles du sommeil, la nervosité, l'augmentation du rythme cardiaque et l'excès d'apport en sucres.

Parallèlement, on observe en Algérie une tendance croissante vers les produits naturels, fonctionnels et à forte valeur nutritionnelle. Les consommateurs accordent désormais une importance accrue à la composition des aliments et privilégient de plus en plus les produits « clean label », exempts d'additifs artificiels et formulés à partir d'ingrédients naturels. Cette évolution est particulièrement marquée chez les populations urbaines, les sportifs, les étudiants universitaires et les consommateurs soucieux de leur santé.Dans ce contexte, le projet répond à un besoin émergent du marché en proposant une boisson énergétique fonctionnelle naturelle reposant sur des extraits végétaux bioactifs et une technologie innovante de nanoémulsification. Cette approche permet de se différencier clairement des produits existants grâce à une meilleure biodisponibilité des composés actifs, une libération énergétique progressive et l'absence de caféine ajoutée ou d'édulcorants artificiels.

8.1. Segmentation du marché cible

Le produit s'adresse principalement à plusieurs catégories de consommateurs :

- **Étudiants et universitaires** recherchant une amélioration de la concentration et des performances cognitives.
- **Professionnels et cadres** soumis à des charges de travail importantes nécessitant vigilance et endurance mentale.
- **Sportifs amateurs et professionnels** recherchant une source d'énergie naturelle et durable.
- **Consommateurs soucieux de leur santé** privilégiant les produits naturels et fonctionnels.

- **Personnes souhaitant réduire leur consommation de caféine** tout en maintenant un niveau élevé de performance cognitive.

8.2. Analyse de la concurrence

La concurrence est principalement constituée de boissons énergétiques conventionnelles nationales et internationales présentes dans les grandes surfaces, les supérettes, les stationsservice et les commerces de proximité.

Les principaux concurrents se distinguent par :

- Une forte teneur en caféine et en sucres.
- L'utilisation d'additifs et d'arômes artificiels.
- Une action stimulante rapide mais souvent de courte durée.
- Une faible valorisation des ingrédients naturels et des technologies innovantes de biodisponibilité.

À l'inverse, le projet se distingue par :

- Une formulation 100 % naturelle.
- Une approche **clean label**.
- L'intégration de la **nanoémulsification**.
- L'utilisation de **L-théanine, ginseng, polyphénols et vitamines**.
- Une stimulation cognitive douce et durable.

8.3. Opportunités du marché

Les principales opportunités identifiées sont :

- Croissance du marché des aliments et boissons fonctionnels.
- Sensibilisation accrue des consommateurs aux questions de santé et de nutrition.
- Faible présence de boissons énergétiques naturelles à haute valeur technologique sur le marché algérien.
- Développement du commerce électronique et des circuits de distribution spécialisés.
- Possibilité d'extension vers les marchés maghrébins et africains.

8.4. Avantage concurrentiel du projet

L'avantage concurrentiel repose sur la combinaison de trois facteurs différenciants :

1. **Naturalité du produit** grâce à une formulation basée sur des ingrédients végétaux bioactifs.
2. **Innovation technologique** via l'utilisation de la nanoémulsification pour améliorer la stabilité et la biodisponibilité.
3. **Positionnement santé et bien-être** offrant une énergie progressive et durable sans les inconvénients des boissons énergétiques conventionnelles.

Ainsi, le marché algérien présente un potentiel favorable pour l'introduction d'une boisson énergétique fonctionnelle de nouvelle génération, répondant simultanément aux attentes de performance, de naturalité, de sécurité alimentaire et d'innovation technologique.

9.Analyse SWOT

L'analyse SWOT synthétise les forces, faiblesses, opportunités et menaces du projet BEF dans le contexte du marché algérien des boissons fonctionnelles (Tableau 6). **Tableau 6.** Analyse SWOT

Tableau 6: Analyse SWOT

FORCES & FAIBLESSES	**OPPORTUNITES & MENACES**
FORCES (Strengths) • Produit 100% naturel, sans caféine ni édulcorants artificiels. • Nanoémulsification (gouttelettes < 200 nm, PDI 0,18). • Haute biodisponibilité des actifs (liposolubles & hydrosolubles). • Synergie innovante : ginseng + matcha + Lthéanine • Arômes 100% naturels (jus frais + HE par hydrodistillation). • Score hédonique 7,7/9 ; 26/30 panelistes declarent acheter. • Soutien institutionnel via le dispositif Diplôme-Startup. •	**OPPORTUNITES (Opportunités)** • Marche algérien boissons fonctionnelles en croissance (+12%/an) • Segment health-conscious inexploité localement (2,5 M conso.) • Soutien financier : ANSEJ, ANADE, fonds d'investissement • Aucun concurrent local 100% naturel sans caféine • Digitalisation croissante → e-commerce facilite • • Tendance mondiale clean label & boissons fonctionnelles • Partenariats : pharmacies, clubs sport, universités • Export potentiel vers les marches Extérieur •
FAIBLESSES (Weaknesses) • Marque inconnue, notoriété zéro au démarrage • Investissement initial élevé (3 000 000 DZD) • • Durée de conservation limitée sans conservateurs • Dépendance aux importations (lécithine, Lthéanine, vitamines) • Certification sanitaire (CACQE, Halal) longue à obtenir • Capacité de production limitée à l'échelle laboratoire • Prix premium (75 DZD/unité) freinant l'adoption de masse •	**MENACES (Threads)** • Entrée de multinationales (Red Bull, Monster) segment naturel • Règlementation sanitaire algérienne contraignante • Fragilité chaine d'apport en matières premières importées • Sensibilité-prix élevée des consommateurs algériens • Risque d'imitation rapide de la formule • • Instabilité des taux de change (impact couts importation) • Saisonnalité des fruits frais (fraise, orange) •

10.Modèle d'Affaires Canvas (BMC)

Le Business Model Canvas ci-dessous présente la structure du modèle économique de la startup BEF selon les 9 blocs fondamentaux de création de valeur(Tableau 7).

Tableau 7: Modèle d'Affaires Canvas (BMC)

<table>
<tr>
<td rowspan="2">Partenaires Clés
• Incubateur universitaire
• Labos universitaires (DLS, micro.) • Agriculteurs locaux (fruits frais)
• Fournisseurs EU/Asie (vitamines, Lthe.)
• ANSEJ / ANADE
• IANOR / CACQE
• Pharmacies / clubs sport</td>
<td>Activités Clés
• Extraction éthanolique (ginseng, matcha, fruits)
• Hydrodistillation HE (citron, orange) • Pressage à froid des jus frais • Nanoémulsification (ultrasonicateur) • Contrôle qualité & physico-chimique • Marketing digital & e-commerce</td>
<td>Proposition de Valeur • Boisson 100% naturelle sans caféine
• Energy durable (ginseng+matcha+Lthe.)
• Haute biodisponibilité (nanoémulsification < 200nm)
• Sucrage naturel (stevia + sucre de coco)
• 2 saveurs naturelles : fraise, orange
Certifiable Halal & Bio
• Score hédonique. 7,7/9 ; forte intention d'achat</td>
<td>Relations Clients
• Programme fidélité digital
• Instagram, TikTok, LinkedIn
• Micro-influenceurs sante & sport
• Echantillonnage (univ., clubs sport) • Service client via app mobile
• Newsletter & blog sante</td>
<td>Segments Clients
• Sportifs amateurs & professionnels
• Etudiants & jeunes actifs (18-45 ans)
• Consommateurs health-conscious • Intolérances à la caféine
• Femmes enceintes & hypertendus
• Consommateurs vegans & bio</td>
</tr>
<tr>
<td>Ressources Clés
• Ultrasonicateur a sonde (20 kHz)
• Rotavapor & Hydrodistillateur
• Formule & protocoles R&D propriétaires • Equipe 5 experts agroalimentaires
• App mobile & plateforme ecommerce</td>
<td>Canaux
• App mobile & site e-commerce (Ph.1)
• Pharmacies & parapharmacies (Ph.2)
• Clubs sport & salles fitness
• GS bio & épiceries sante
• Foires agroalimentaires nationales
• Export Maghreb (Ph.3)</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td colspan="3">Structure de Couts
• Matières premières
• Main d'œuvre
• Energie & loyer
• Marketing digital
• Investissement initial</td>
<td colspan="2">Sources de Revenus
• Vente directe B2C (application mobile, site web)
• Vente B2B (pharmacies, clubs, GS bio)
• Abonnements mensuels (box boissons sante)
• Licences technologie Futures (formule nanemulsifiee)
• CA prévisionnel N+1 : 7,2 M à 12,6 M DZD</td>
</tr>
</table>

11. Plan d'organisation et de fonctionnement du projet

Le plan d'organisation et de fonctionnement du projet de production de boisson fonctionnelle décrit la structuration interne de l'unité, la répartition des responsabilités ainsi que le déroulement opérationnel des activités. Il vise à assurer une gestion efficace des ressources, une maîtrise du processus de production et une garantie de qualité du produit fini, conformément aux normes agroalimentaires en vigueur.

11.1 Organisation générale du projet

L'organisation du projet repose sur une structure hiérarchisée et fonctionnelle permettant une coordination optimale entre les différents services :

- Direction du projet (Gérant) : assure la planification stratégique, la gestion globale de l'unité, la prise de décision et le suivi des performances économiques et techniques.
- Service de production : chargé de la fabrication de la boisson fonctionnelle, incluant la préparation, le mélange, les traitements technologiques et le conditionnement.
- Service qualité et laboratoire : responsable du contrôle des matières premières, du suivi des paramètres physicochimiques et microbiologiques, et de la validation des produits finis.
- Service recherche et développement (R&D) : développe les formulations, optimise les recettes et intègre les innovations fonctionnelles (extraits naturels, polyphénols, ingrédients bioactifs).
- Service logistique et approvisionnement : assure la gestion des stocks, l'achat des matières premières et l'organisation des flux internes.
- Service commercial et marketing : responsable de l'étude du marché, de la stratégie de distribution, de la communication et du développement des ventes.

11.2 Mode de fonctionnement du projet

Le fonctionnement du projet repose sur une chaîne de production organisée en plusieurs étapes successives et contrôlées :

1. Approvisionnement ○ Achat et réception des matières premières (fruits, extraits végétaux, ingrédients fonctionnels).
    - Vérification de la conformité et de la qualité.
2. Stockage ○ Conservation des matières premières dans des conditions contrôlées. ○ Application du système FIFO (First In First Out) pour la gestion des stocks**.**

3. Formulation et préparation ○ Dosage précis des ingrédients selon les formulations définies par le service R&D. ○ Mélange et homogénéisation des composants. ○ Intégration éventuelle de procédés innovants (nanoémulsion, extraction, enrichissement bioactif).
4. Traitement technologique ○ Pasteurisation ou traitement thermique adapté.
   - ○ Stabilisation des composés actifs (polyphénols, vitamines, antioxydants).
5. Conditionnement ○ Mise en bouteilles ou emballages alimentaires.
   - ○ Scellage, étiquetage et codification des lots.
6. Contrôle qualité final ○ Analyses microbiologiques et physicochimiques. ○ Vérification de la conformité aux normes de sécurité alimentaire.
7. Stockage des produits finis ○ Entreposage dans un espace adapté garantissant la conservation des propriétés du produit.
8. Distribution et commercialisation ○ Mise sur le marché via différents canaux : grandes surfaces, points de vente spécialisés, pharmacies, et plateformes numériques.

11.3 Organisation des ressources humaines

Le fonctionnement du projet repose sur une coordination efficace des équipes :

- Le gérant supervise l'ensemble du système de production et assure la cohérence stratégique.
- Les cadres techniques (ingénieurs, spécialistes agroalimentaires) assurent la formulation, la R&D et le contrôle qualité.
- Les agents de maîtrise coordonnent la production, la logistique et le laboratoire.
- Les agents d'exécution assurent les opérations de fabrication, d'hygiène, de conditionnement et de transport.

Cette répartition garantit une continuité opérationnelle et une optimisation des performances industrielles.

11.4 Système de gestion et de contrôle

Le projet adopte un système de gestion basé sur :

- L'application des normes d'hygiène et de sécurité alimentaire (HACCP).
- Le contrôle qualité à chaque étape du processus de production.
- La traçabilité complète des matières premières et des produits finis.
- La planification de la production selon la demande du marché.

- L'amélioration continue des procédés et des formulations.

12. Plan budgétaire

12.2 Estimation des revenus du projet 12.2.1 Estimation du volume des ventes annuelles

12.2.1. Hypothèse :

- Bouteille de 250 mL
- Prix de vente moyen : **120 DA**

Tableau 8: Estimation du volume des ventes annuelles

Désignation	**Année 1**	**Année 2**	**Année 3**
Produit 1 : ALPHA FRAISE			
Quantité vendue	100 000	130 000	160 000
Prix unitaire	120 DA	120 DA	120 DA
Valeur des ventes	12 000 000	15 600 000	19 200 000
Produit 2 : ALPHA ORANGE			
Quantité vendue	100 000	130 000	160 000
Prix unitaire	120 DA	120 DA	120 DA
Valeur des ventes	12 000 000	15 600 000	19 200 000
Chiffre d'affaires total	**24 000 000**	**31 200 000**	**38 400 000**

12.2.2 Calcul du résultat annuel

Tableau 9: Calcul du résultat annuel

Désignation	**Année 1 (DA)**	**Année 2 (DA)**	**Année 3 (DA)**
Chiffre d'affaires (1)	24 000 000	31 200 000	38 400 000
Achats consommés (2)	4 800 000	5 955 000	7 280 000
Charges externes (3)	2 800 000	3 200 000	3 600 000
Valeur ajoutée (1 − 2 − 3)	**16 400 000**	**22 045 000**	**27 520 000**
Salaires et charges sociales (4)	6 000 000	7 500 000	9 000 000
Excédent brut d'exploitation	**10 400 000**	**14 545 000**	**18 520 000**
Amortissements	2 630 000	2 630 000	2 630 000
Résultat d'exploitation	**7 770 000**	**11 915 000**	**15 890 000**
Impôts (≈15 %)	1 165 500	1 787 250	2 383 500
Résultat net	**6 604 500**	**10 127 750**	**13 506 500**
Évolution du chiffre d'affaires	—	+30 %	+23 %

12.1 Estimation des coûts du projet

12.1.1 Estimation du montant total de l'investissement : (coût du projet)

Tableau 10: Évaluation du montant global de l'investissement

Désignation	Montant (DA)
Machines et équipements de production (cuves inox, homogénéisateur haute pression, ultrasonicateur, hydrodistillateur, broyeur, filtration, ligne de conditionnement)	18 500 000
Aménagement du local (zone agroalimentaire, revêtement hygiénique, installations sanitaires et électriques)	4 000 000
Actifs biologiques (animaux, arbres, etc.)	0
Matériel roulant	1 200 000
Matériel de bureau	800 000
Matériel informatique	1 500 000
Matériel audiovisuel	500 000
Matériel de télécommunication	300 000
Installation des équipements (montage, mise en service et validation des procédés)	2 500 000
Frais généraux liés à la création (études, autorisations, formation)	1 200 000
Fonds de roulement (matières premières, emballages et additifs naturels)	3 000 000
Montant total de l'investissement (coût du projet)	**33 000 000 DA**

12.1.2 Estimation des achats de matières premières du projet

Tableau 11: Estimation des achats de matières premières

Liste des matières premières	Année 1	Année 2	Année 3
Matière première 1 : Jus de fruits (fraise / orange)	Quantité achetée : 20 000 L	25 000 L	30 000 L
Prix unité	120 DA/L	125 DA/L	130 DA/L
Coût d'achat de la matière première 1	2 400 000 DA	3 125 000 DA	3 900 000 DA

Matière première 2 : Extrait de ginseng, Extrait de Matcha	Quantité achetée : 150 kg	180 kg	220 kg
Prix unité	8 000 DA/kg	8 500 DA/kg	9 000 DA/kg
Coût d'achat de la matière première 2	1 200 000 DA	1 530 000 DA	1 980 000 DA
Matière première 3 : L-théanine + vitamines (B, C, E)	Quantité achetée : lot	lot	lot
Prix unité	1 200 000 DA	1 300 000 DA	1 400 000 DA
Coût d'achat de la matière première 3	1 200 000 DA	1 300 000 DA	1 400 000 DA
Montant total des achats de matières premières	**4 800 000 DA**	**5 955 000 DA**	**7 280 000 DA**

12.1.3 Estimation des coûts de la main-d'œuvre

Tableau 12: Estimation des coûts de la main-d'œuvre

Intitulé du poste	**Nombre de travailleurs**			**Montant du salaire mensuel (DA)**		
	Année 1	Année 2	Année 3	Année 1	Année 2	Année 3
Le gérant	1	1	1	80 000	90 000	100 000
Cadres (ingénieur agroalimentaire, responsable qualité, marketing)	3	3	4	70 000	80 000	90 000
Agents de maîtrise (technicien de production, magasinier, secrétariat)	3	4	4	45 000	50 000	55 000
Agents d'exécution (opérateurs, chauffeur, agent d'entretien)	5	6	8	35 000	40 000	45 000

Tableau 13: Coût annuel estimé de la main-d'œuvre

Catégorie	**Année 1 (DA/an)**	**Année 2 (DA/an)**	**Année 3 (DA/an)**
Gérant	960 000	1 080 000	1 200 000

Cadres	2 520 000	2 880 000	4 320 000
Agents de maîtrise	1 620 000	2 400 000	2 640 000
Agents d'exécution	2 100 000	2 880 000	4 320 000
Total annuel	**7 200 000**	**9 240 000**	**12 480 000**

12.1.4 Estimation des coûts externes du projet

Tableau 14: Estimation des coûts externes du projet

Désignation	**Année 1 (DA)**	**Année 2 (DA)**	**Année 3 (DA)**
Frais d'électricité / de gaz / d'eau	800 000	950 000	1 100 000
Coûts de maintenance et de réparation	500 000	650 000	800 000
Frais de location	1 200 000	1 200 000	1 200 000
Frais d'assurance du matériel et des équipements	300 000	350 000	400 000
Frais de marketing (publicité et promotion)	600 000	900 000	1 200 000
Coûts de formation et d'entraînement	200 000	250 000	300 000
Autres frais généraux (charges externes)	400 000	500 000	600 000
Total des coûts externes	**4 000 000**	**4 800 000**	**5 600 000**

12.1.5 Estimation des coûts d'amortissement des investissements

Tableau 15: Estimation des coûts d'amortissement des investissements

Désignation	**Durée d'amortissement (années)**	**Annuité d'amortissement (DA)**
Machines et équipements de production (18 500 000 DA)	10	1 850 000
Matériel roulant (1 200 000 DA)	5	240 000
Matériel de bureau (800 000 DA)	10	80 000
Matériel informatique (1 500 000 DA)	5	300 000
Matériel audiovisuel (500 000 DA)	5	100 000
Matériel de télécommunication (300 000 DA)	5	60 000
Montant total		**2 630 000 DA/an**

13.Conclusion

Le présent projet de développement de boissons fonctionnelles à base de matrices fruitées enrichies en composés bioactifs naturels s'inscrit dans une dynamique d'innovation appliquée au secteur agroalimentaire. L'association de la technologie de nanoémulsion avec des ingrédients fonctionnels tels que les extraits de ginseng, les vitamines (B, C, E) et la L-théanine permet l'élaboration d'un produit stable physicochimiquement, technologiquement maîtrisé et à forte valeur ajoutée fonctionnelle, répondant aux exigences actuelles des marchés en matière de nutrition et de santé.

L'analyse technico-économique réalisée met en évidence la viabilité du projet, caractérisée par une amélioration progressive des indicateurs de performance économique et une trajectoire de rentabilité sur l'horizon étudié. Ces résultats traduisent la capacité du projet à s'inscrire durablement dans un marché émergent des boissons fonctionnelles, en croissance au niveau national.

Sur le plan macroéconomique, ce projet contribue à la création de valeur ajoutée locale et à la structuration du tissu agroalimentaire national à travers la génération d'emplois directs et indirects, ainsi que le développement de compétences techniques et technologiques. Il participe également à la valorisation des ressources agricoles locales, notamment les fruits, tout en intégrant des intrants bioactifs importés à haute valeur fonctionnelle, dans une logique d'amélioration de la qualité et de différenciation produit.

Par ailleurs, ce projet s'inscrit dans une dynamique de substitution partielle aux importations de produits finis, contribuant ainsi à la réduction de la dépendance externe et au renforcement de la compétitivité de l'offre nationale. Il participe enfin à la diversification de l'économie algérienne par l'introduction d'innovations technologiques dans l'industrie agroalimentaire et la création de nouveaux segments à forte valeur ajoutée.

En définitive, ce projet constitue une initiative industrielle structurée, à la fois économiquement pertinente et technologiquement innovante, s'inscrivant dans une perspective de développement durable et de renforcement de la souveraineté productive nationale dans le secteur agroalimentaire

Références bibliographiques

Andersen, J. E. T., & Menong, M. (2025). Uncertainty of Routine pH Measurements Evaluated by the Principle of Pooled Calibrations. *Indonesian Journal of Chemical Analysis (IJCA)*, *8*(1), 18-30. https://doi.org/10.20885/ijca.vol8.iss1.art2

Anjali, C., Sharma, Y., Mukherjee, A., & Chandrasekaran, N. (2012). Neem oil (Azadirachta indica) nanoemulsion: A potent larvicidal agent against Culex quinquefasciatus. Pest Management Science, 68(2), 158–163. https://doi.org/10.1002/ps.2233

Anton, N., & Vandamme, T. F. (2009). The universality of low-energy nano-emulsification. *International Journal of Pharmaceutics, 377*(1–2), 142–147. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2009.05.014

Anton, N., Benoit, J. P., & Saulnier, P. (2008). Design and production of nanoparticles formulated from nano-emulsion templates: A review. Journal of Controlled Release, 128(3), 185–199. https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2008.02.007

Badawy, M. E. I., Saad, A. F. S. A., Tayeb, E. S. H. M., Mohammed, S. A., & Abd-Elnabi, A. D. (2017). Optimization and characterization of the formation of oil-in-water diazinon nanoemulsions: Modeling and influence of the oil phase, surfactant and sonication. *Journal of Environmental Science and Health, Part B, 52*(12), 896–911. https://doi.org/10.1080/03601234.2017.1362941

Becher, P. (Ed.). (1996). Encyclopedia of emulsion technology (Vol. 4). Marcel Dekker.

Buscall, R., Davis, S. S., & Potts, D. C. (1979). The effect of long-chain alkanes on the stability of oilin-water emulsions: The significance of Ostwald ripening. Colloid and Polymer Science, 257(7), 636–644. https://doi.org/10.1007/BF01548833

Cappelletti, S., Piacentino, D., Fineschi, V., Frati, P., Cipolloni, L., & Aromatario, M. (2018). Caffeine-related deaths: Manner of deaths and categories at risk. Nutrients, 10(5), 611.

Chang, Y., & McClements, D. J. (2014). Optimization of orange oil nanoemulsion formation by isothermal low-energy methods: Influence of the oil phase, surfactant, and temperature. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *62*(10), 2306–2312. https://doi.org/10.1021/jf500160y Chavda, V. P., & Shah, D. (2017). A review on novel emulsification technique: A nanoemulsion. *Journal of Pharmacology and Toxicological Studies, 5*(2), 29–37.

Chiesa, M., Garg, J., Kang, Y. T., & Chen, G. (2008). Thermal conductivity and viscosity of water-inoil nanoemulsions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 326*(1– 2), 67–72. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2008.05.028

Çinar, K. (2017). A review on nanoemulsions: Preparation methods and stability. Trakya University Journal of Engineering Sciences, 18(2), 73–83.

CMBEBIH. (2017). *Proceedings of the CMBEBIH 2017 Conference* (pp. 317–322). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4166-2

Craig, D. Q. M., Barker, S. A., Banning, D., & Booth, S. W. (1995). An investigation into the mechanisms of self-emulsification using particle size analysis and low-frequency dielectric spectroscopy. *International Journal of Pharmaceutics, 114*(1), 103–110. https://doi.org/10.1016/0378-5173(94)00222-Q

Dasgupta, N., Ranjan, S., & Gandhi, M. (2019). Nanoemulsions in food: Market demand. *Environmental Chemistry Letters*, *17*(3), 1003–1009. https://doi.org/10.1007/s10311-019-00856-2

Du, Z., Wang, C., Tai, X., Wang, G., & Liu, X. (2016). Optimization and characterization of biocompatible oil-in-water nanoemulsion for pesticide delivery. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 4*(3), 983–991. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5b01055

Dzhanfezova, T., Barba-Espín, G., Müller, R., Jørnsgaard, B., Hegelund, J. N., Madsen, B., Larsen, D., Vega, M. V. M., & Toldam-Andersen, T. (2020). Anthocyanin profile, antioxidant activity and total phenolic content of a strawberry (*Fragaria* × *ananassa* Duch) genetic resource collection. *Food Bioscience*, 36, 100620. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100620

Ehlers, A., Marakis, G., Lampen, A., & Hirsch-Ernst, K. I. (2019). Risk assessment of energy drinks with focus on cardiovascular parameters and energy drink consumption in Europe. Food and Chemical Toxicology, 130, 109–121.

Epilepsy Foundation. (2023). Energy drinks may increase the risk of seizures according to a new study. Epilepsy Foundation.

Feng, J., Zhang, Q., Liu, Q., Zhu, Z., McClements, D. J., & Jafari, S. M. (2018). Application of nanoemulsions in formulation of pesticides. In S. M. Jafari & D. J. McClements (Eds.), *Nanoemulsions: Formulation, applications, and characterization* (pp. 303–325). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811838-2.00012-6

Forgiarini, A., Esquena, J., González, C., & Solans, C. (2001). Formation of nano-emulsions by lowenergy emulsification methods at constant temperature. *Langmuir, 17*(7), 2076–2083. https://doi.org/10.1021/la001362n

Frost, L., Vestergaard, P., & Mosekilde, L. (2004). Hyperthyroidism and risk of atrial fibrillation or flutter: A population-based study. ACC Current Journal Review, 13(5), 13.

Fryd, M. M., & Mason, T. G. (2012). Nanoinclusions in cryogenically quenched nanoemulsions. Langmuir, 28(32), 12015–12021. https://doi.org/10.1021/la301834x

Grau-Fuentes, E., Rodrigo, D., Garzón, R., & Rosell, C. M. (2023). Understanding marketed plant-based beverages: From ingredients technological function to their nutritional value. *Journal of Functional Foods*, 105609. https://doi.org/10.1016/j.jff.2023.105609

Graves, S., Meleson, K., Wilking, J., Lin, M. Y., & Mason, T. G. (2005). Structure of concentrated nanoemulsions. *Journal of Chemical Physics, 122*(13), 134703. https://doi.org/10.1063/1.1874952

Gupta, A., Eral, H. B., Hatton, T. A., & Doyle, P. S. (2016). Nanoemulsions: Formation, properties and applications. Soft Matter, 12(11), 2826–2841. https://doi.org/10.1039/C5SM02958A

Gutiérrez, J. M., González, C., Maestro, A., Solé, I., Pey, C. M., & Nolla, J. (2008). Nanoemulsions: New applications and optimization of their preparation. *Current Opinion in Colloid & Interface Science, 13*(4), 245–251. https://doi.org/10.1016/j.cocis.2008.01.005

Gutiérrez-Hellín, J., & Varillas-Delgado, D. (2021). Energy drinks and sports performance, cardiovascular risk, and genetic associations: Future prospects. Nutrients, 13(3), 715.

Hasan, H. M., Leanpolchareanchai, J., & Jintapattanakit, A. (2015). Preparation of virgin coconut oil nanoemulsions by phase inversion temperature method. *Advanced Materials Research*, *1060*, 99–102. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1060.99

Herrick, J., Shecterle, L. M., & St Cyr, J. A. (2009). D-ribose—An additive with caffeine. Medical Hypotheses, 72(5), 499–500.

Hesseien, M., Singh, N., Kim, C.-H., & Prouzet, E. (2011). Stability and tunability of O/W nanoemulsions prepared by PIC. *Langmuir, 27*(5), 2299–2307.

https://doi.org/10.1016/j.jep.2024.118506

Huang, K. H., Chang, C. C., Ho, J. D., Lu, R. H., & Tsai, L. H. (2011). Role of taurine on acid secretion in the rat stomach. Journal of Biomedical Science, 18, 11.

Jadhav, C., Kate, V., & Payghan, S. A. (2015). Investigation of effect of non-ionic surfactant on preparation of griseofulvin non-aqueous nanoemulsion. *Journal of Nanostructure in Chemistry, 5*(2), 107–113. https://doi.org/10.1007/s40097-014-0141-y

Jensen, J., & Thirstrup, K. (2014). Direct traceability for ultra-pure water conductivity. *NCSLI Measure*, 9, 68–72. https://doi.org/10.1080/19315775.2014.11721676

Jintapattanakit, A. (2018). Preparation of nanoemulsions by phase inversion temperature (PIT). *Pharmaceutical Sciences Asia, 45*(1), 1–12. https://doi.org/10.29090/psa.2018.01.001

Kawanami, T., Togashi, K., Fumoto, K., Hirano, S., Zhang, P., Shirai, K., & Hirasawa, S. (2016). Thermophysical properties and thermal characteristics of phase change emulsion for thermal energy storage media. *Energy*, *117*, 562–568. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.021

Kaźmierczak-Barańska, J., Boguszewska, K., Adamus-Grabicka, A. A., & Karwowski, B. (2020). Two faces of vitamin C—antioxidative and pro-oxidative agent. *Nutrients*, 12(5), 1501. https://doi.org/10.3390/nu12051501

Kedenburg, S., Vieweg, M., Gissibl, T., & Giessen, H. (2012). Linear refractive index and absorption measurements of nonlinear optical liquids in the visible and near-infrared spectral region. *Optical Materials Express*, 2, 1588–1611. https://doi.org/10.1364/OME.2.001588

Kelly, S. P., Gomez-Ramirez, M., Montesi, J. L., & Foxe, J. J. (2008). L-theanine and caffeine in combination affect human cognition as evidenced by oscillatory alpha-band activity and attention task performance. *The Journal of Nutrition*, 138(8), 1572S–1577S. https://doi.org/10.1093/jn/138.8.1572S

Khandavilli, S., & Panchagnula, R. (2007). Nanoemulsions as versatile formulations for paclitaxel delivery: Peroral and dermal delivery studies in rats. *Journal of Investigative Dermatology, 127*(1), 154–162. https://doi.org/10.1038/sj.jid.5700485

Komaiko, J. S., & McClements, D. J. (2016). Formation of food-grade nanoemulsions using low-energy preparation methods: A review of available methods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *15*(2), 331–352. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12189

Koroleva, M. Y., & Yurtov, E. V. (2012). Nanoemulsions: The properties, methods of preparation and promising applications. Russian Chemical Reviews, 81(1), 21–43. https://doi.org/10.1070/RC2012V081N01ABEH004219

Lefebvre, G., Riou, J., Bastiat, G., Roger, E., Frombach, K., Gimel, J.-C., Saulnier, P., & Calvignac, B. (2017). Spontaneous nano-emulsification: Process optimization and modeling for the prediction of nanoemulsion size and polydispersity. *International Journal of Pharmaceutics, 534*(1–2), 220–228. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2017.10.017

Lévy, S., Santini, L., Capucci, A., Oto, A., Santomauro, M., Riganti, C., Raviele, A., & Cappato, R. (2019). European Cardiac Arrhythmia Society statement on the cardiovascular events associated with the use or abuse of energy drinks. Journal of Interventional Cardiac Electrophysiology, 56(1), 99–115.

Maali, A., & Mosavian, M. T. H. (2013). Preparation and application of nanoemulsions in the last decade (2000–2010). *Journal of Dispersion Science and Technology, 34*(1), 92–105. https://doi.org/10.1080/01932691.2011.648498

Mangi, M. A., Rehman, H., Rafique, M., & Illovsky, M. (2017). Energy drinks and the risk of cardiovascular disease: A review of current literature. Cureus, 9(6), e1322.

Mason, T. G., Graves, S. M., Wilking, J. N., & Lin, M. Y. (2006). Extreme emulsification: Formation and structure of nanoemulsions. Journal of Physics: Condensed Matter, 18(41), S193–S199.

McClements, D. J. (2011). Edible nanoemulsions: Fabrication, properties, and functional performance. Soft Matter, 7(6), 2297–2316. https://doi.org/10.1039/C0SM00549E

Mei, Z., Xu, J., & Sun, D. (2011). O/W nano-emulsions with tunable PIT induced by inorganic salts. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 375*(1–3), 102–108. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.11.069

Meleson, K., Graves, S., & Mason, T. G. (2004). Formation of concentrated nanoemulsions by extreme shear. Soft Materials, 2(2–3), 109–123. https://doi.org/10.1081/SMTS-200056102

Meng, W. J., Li, Y., & Zhou, Z. G. (2012). Anaphylactic shock and lethal anaphylaxis caused by compound amino acid solution, a nutritional treatment widely used in China. Amino Acids, 42(6), 2501–2505.

Miles, E. A., & Calder, P. C. (2021). Effects of citrus fruit juices and their bioactive components on inflammation and immunity: A narrative review. *Frontiers in Immunology*, 12, 712608. https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.712608

Mohammed, N. K., Muhialdin, B. J., & Hussin, A. S. M. (2020). Characterization of nanoemulsion of *Nigella sativa* oil and its application in ice cream. *Food Science & Nutrition*, 8, 2608–2618. https://doi.org/10.1002/fsn3.1500

Morales, D., Gutiérrez, J. M., García-Celma, M. J., & Solans, Y. C. (2003). A study of the relation between bicontinuous microemulsions and oil/water nano-emulsion formation. *Langmuir*, *19*(17), 7196–7200. https://doi.org/10.1021/la0300737

Morgan, J. C., & Sethi, K. D. (2005). Drug-induced tremors. The Lancet Neurology, 4(12), 866–876.

Ozawa, K., Solans, C., & Kunieda, H. (1997). Spontaneous formation of highly concentrated oil-inwater emulsions. *Journal of Colloid and Interface Science, 188*(1), 275–282. https://doi.org/10.1006/jcis.1997.4761

Persad, L. A. B. (2011). Energy drinks and the neurophysiological impact of caffeine. Frontiers in Neuroscience, 5, 116.

Protano, C., Valeriani, F., De Giorgi, A., Marotta, D., Ubaldi, F., Napoli, C., Liguori, G., Spica, V. R., Vitali, M., & Gallè, F. (2023). Consumption patterns of energy drinks in university students: A systematic review and meta-analysis. Nutrition, 107, 111904.

Qayum, A., Rashid, A., Khan, A. A., Zhong, M., Liu, Y., Hussain, M., Virk, M. S., et al. (2024). Exploring the interface dynamics of emulsion gel via a novel non-destructive technique provides insights into gel formation mechanisms. *Food Bioscience*, 61, 104721.

Qiu, Y. (2025). Comparative analysis of polyphenols and flavonoids composition and their scavenging capacity for DPPH radicals in organic tea. *Chemical Product and Process Modeling*. https://doi.org/10.1515/cppm-2025-0222

Rao, J., & McClements, D. J. (2010). Stabilization of phase inversion temperature nanoemulsions by surfactant displacement. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 58*(11), 7059–7066. https://doi.org/10.1021/jf100990r

Richards, G., Smith, A. P., Distelberg, B. J., Staack, A., Elsen, K. D., & Sabaté, J. (2016). A review of energy drinks and mental health, with a focus on stress, anxiety, and depression. Journal of Caffeine Research, 6(2), 49–63.

Rizkallah, G. S., Mertens, M. K., & Brown, M. L. (2005). Should liver enzymes be checked in a patient taking niacin? The Journal of Family Practice, 54(3), 265–282.

Robins, M., & Fillery-Travis, A. (1989). Colloidal dispersions. Cambridge University Press.

Rossi, S., De Chiara, V., Musella, A., Mataluni, G., Sacchetti, L., Siracusano, A., Bernardi, G., Usiello, A., & Centonze, D. (2010). Effects of caffeine on striatal neurotransmission: Focus on cannabinoid CB1 receptors. Molecular Nutrition & Food Research, 54(4), 525–531.

Saberi, A. H., Fang, Y., & McClements, D. J. (2015). Thermal reversibility of vitamin E-enriched emulsion-based delivery systems produced using spontaneous emulsification. *Food Chemistry, 185*, 254–260. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.080

Safaya, M., & Rotliwala, Y. C. (2020). Nanoemulsions: A review on low energy formulation methods, characterization, applications and optimization technique. Materials Today: Proceedings, 27, 454–459.

Sagitani, H., Hattori, T., Nabeta, K., & Nagai, M. (1983). Formation of O/W emulsion having fine and uniform droplets by the surfactant (D) phase emulsification method. *Nippon Kagaku Kaishi, 1983*(9), 1399–1404. https://doi.org/10.1246/nikkashi.1983.1399

Sagitani, H., Nabeta, K., & Nagai, M. (1991). A new preparing method for fine O/W emulsions by Dphase emulsification and their application to cosmetic industry. *Journal of Japan Oil Chemists' Society, 40*(11), 988–994. https://doi.org/10.5650/jos1956.40.988

Saito, H., & Shinoda, K. (1970). The stability of W/O type emulsions as a function of temperature and of the hydrophilic chain length of the emulsifier. *Journal of Colloid and Interface Science, 32*(4), 647–651. https://doi.org/10.1016/0021-9797(70)90158-X

Schüttler, D., Rudi, W.-S., Bauer, A., Hamm, W., & Brunner, S. (2022). Impact of energy drink versus coffee consumption on periodic repolarization dynamics: An interventional study. European Journal of Nutrition, 61(5), 2847–2851.

Sessa, M., Ferrari, G., & Donsì, F. (2015). Novel edible coating containing essential oil nanoemulsions to prolong the shelf life of vegetable products. *Chemical Engineering Transactions, 43*, 55–60. https://doi.org/10.3303/CET1543010

Setya, S., Talegaonkar, S., & Razdan, B. K. (2014). Nanoemulsions: Formulation methods and stability aspects. World Journal of Pharmaceutical and Pharmaceutical Sciences, 3, 375–394.

Shafiq-un-Nabi, S., Shakeel, F., Talegaonkar, S., Ali, J., Baboota, S., Ahuja, A., Khar, R. K., & Ali, M. (2007). Formulation development and optimization using nanoemulsion technique: A technical note. *AAPS PharmSciTech, 8*(2), E12–E17. https://doi.org/10.1208/PT0802028

Shah, R. B., Zidan, A. S., Funck, T., Tawakkul, M. A., Nguyenpho, A., & Khan, M. A. (2007). Quality by design: Characterization of self-nanoemulsified drug delivery systems (SNEDDS) using ultrasonic resonator technology. *International Journal of Pharmaceutics, 336*(1), 189–197. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2007.04.009

Shavlovskaya, O., & Bokova, I. A. (2023). Vitamins B effectiveness in different nosological forms. *Effective Pharmacotherapy*, 19(1), 40–47. https://doi.org/10.33978/2307-3586-2023-19-1-40-47

Shi, C., Yuan, Z., Du, X., Huang, Z., Jia, G., Zhao, H., & Chen, X. (2026). Ltheanine attenuates intestinal oxidative injury in mice through modulation of ferroptosis pathways. The Journal of Nutritional Biochemistry, 126, 110271.

Shinoda, K., & Saito, H. (1969). The stability of O/W type emulsions as functions of temperature and the HLB of emulsifiers: The emulsification by PIT method. *Journal of Colloid and Interface Science, 30*(2), 258–263. https://doi.org/10.1016/S0021-9797(69)80012-3

Sievenpiper, J. L., Purkayastha, S., Grotz, V. L., Mora, M., Zhou, J., Hennings, K., Goody, C. M., & Germano, K. (2025). Dietary guidance, sensory, health and safety considerations when choosing low and no-calorie sweeteners. *Nutrients*, 17(5), 793. https://doi.org/10.3390/nu17050793

Singh, Y., Meher, J. G., Raval, K., Khan, F. A., Chaurasia, M., Jain, N. K., & Chourasia, M. K. (2017). Nanoemulsion: Concepts, development and applications in drug delivery. Journal of Controlled Release, 252, 28–49. https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2017.03.008

Skąpska, S., Marszałek, K., Woźniak, Ł., Szczepańska, J., Danielczuk, J., & Zawada, K. (2020). The development and consumer acceptance of functional fruit-herbal beverages. *Foods*, 9(12), 1819. https://doi.org/10.3390/foods9121819

Solans, C., & Solé, I. (2012). Nano-emulsions: Formation by low-energy methods. *Current Opinion in Colloid & Interface Science, 17*(5), 246–254. https://doi.org/10.1016/j.cocis.2012.07.003

Solans, C., Izquierdo, P., Nolla, J., Azemar, N., & Garcia-Celma, M. J. (2005). Nano-emulsions. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 10(3–4), 102–110. https://doi.org/10.1016/j.cocis.2005.06.004

Solé, I., Maestro, A., González, C., Solans, C., & Gutiérrez, J. M. (2006). Optimization of nanoemulsion preparation by low-energy methods in an ionic surfactant system. *Langmuir, 22*(20), 8326–8332. https://doi.org/10.1021/la0613676

Solé, I., Pey, C. M., Maestro, A., González, C., Solans, C., & Gutiérrez, J. M. (2010). Nanoemulsions prepared by the phase inversion composition method: Preparation variables and scale up. *Journal of Colloid and Interface Science, 344*(2), 417–423. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.11.046

Sonneville-Aubrun, O., Simonnet, J.-T., & L'Alloret, F. (2004). Nanoemulsions: A new vehicle for skincare products. *Advances in Colloid and Interface Science, 108–109*, 145–149. https://doi.org/10.1016/j.cis.2003.10.026

Sugajski, M., Buszewska-Forajta, M., & Buszewski, B. (2023). Functional beverages in the 21st century. Beverages, 9(1), 27.

Sun, H., Liu, K., Wang, W., Tang, B., Gu, J., Zhang, J., Mao, X., Zou, Q., Zeng, H., Liu, W., Guo, C., & Li, H. (2012). Development and characterization of a novel nanoemulsion drug delivery system for potential application in oral delivery of protein drugs. *International Journal of Nanomedicine, 7*, 5529–5543. https://doi.org/10.2147/IJN.S36071

Tadros, T., Izquierdo, P., Esquena, J., & Solans, C. (2004). Formation and stability of nanoemulsions. Advances in Colloid and Interface Science, 108–109, 303–318. https://doi.org/10.1016/j.cis.2003.10.023

Taha, E. I., Samy, A. M., Kassem, A. A., & Khan, M. A. (2005). Response surface methodology for the development of self-nanoemulsified drug delivery system (SNEDDS) of all-trans-retinol acetate. *Pharmaceutical Development and Technology, 10*(3), 321–329. https://doi.org/10.1081/PDT65675

Tang, G., Xu, Y., Zhang, C., Wang, N., Li, H., & Feng, Y. (2021). Green tea and epigallocatechin gallate (EGCG) for the management of nonalcoholic fatty liver disease (NAFLD): Insights into the role of oxidative stress and antioxidant mechanism. *Antioxidants*, 10(7), 1076. https://doi.org/10.3390/antiox10071076

Uchida, K., Meno, K., Korenaga, T., Liu, S., Suzuki, H., Baba, Y., … Arai, T. (2024). Effect of matcha green tea on cognitive functions and sleep quality in older adults with cognitive decline: A randomized controlled study over 12 months. *PLOS ONE*, 19, e0309287. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0309287

Wang, L., Li, X., Zhang, G., Dong, J., & Eastoe, J. (2007). Oil-in-water nanoemulsions for pesticide formulations. *Journal of Colloid and Interface Science, 314*(1), 230–235. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.04.079

Wikoff, D., Welsh, B. T., Henderson, R., Brorby, G. P., Britt, J., Myers, E., Goldberger, J., Lieberman, H. R., O'Brien, C., Peck, J., et al. (2017). Systematic review of the potential adverse effects of caffeine consumption in healthy adults, pregnant women, adolescents, and children. Food and Chemical Toxicology, 109(Part 1), 585–648.

Wolk, B. J., Ganetsky, M., & Babu, K. M. (2012). Toxicity of energy drinks. Current Opinion in Pediatrics, 24(2), 243–251.

Wooster, T. J., Golding, M., & Sanguansri, P. (2008). Ripening stability of nanoemulsions. Langmuir, 24(22), 12758–12765. https://doi.org/10.1021/la801685v

You, D. K., Fuwad, A., Lee, K., Kim, H. K., Kang, L., Kim, S. M., & Jeon, T. J. (2024). Evaluation of the protective role of vitamin E against ROS-driven lipid oxidation in model cell membranes. *Antioxidants*, 13(9), 1135. https://doi.org/10.3390/antiox13091135

Yukuyama, M. N., Oseliero, P. L. F., Kato, E. T. M., Lobënberg, R., de Oliveira, C. L. P., de Araujo, G. L. B., & Bou-Chacra, N. A. (2018). High internal vegetable oil nanoemulsion: D-phase emulsification as a unique low-energy process. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 554, 296–305. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.06.023

Zeng, M., Zhang, K., Yang, J., Zhang, Y., You, P., Yan, L., & Weng, Y. (2024). Effects of Ginseng on Cognitive Function: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Phytotherapy Research*, *38*(12), 6023-6034.https://doi.org/10.1002/ptr.8359

Zhou, Z., Li, M., Zhang, Z., Song, Z., Xu, J., Zhang, M., & Gong, M. (2024). Overview of *Panax ginseng* and its active ingredients protective mechanism on cardiovascular diseases. *Journal of Ethnopharmacology*, 118506.

Zidan, A. S., Sammour, O. A., Hammad, M. A., Megrab, N. A., Habib, M. J., & Khan, M. A. (2007). Quality by design: Understanding the formulation variables of a cyclosporine A selfnanoemulsified drug delivery system by Box–Behnken design and desirability function. *International Journal of Pharmaceutics, 332*(1–2), 55–63. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2006.09.060