REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة 20 اوت1955- سكيكدة

UNIVERSITE 20 AOUT 1955- SKIKDA

Faculté des Sciences

Département des Sciences agronomiques

Mémoire Présenté en Vue de l'Obtention du Diplôme de Master

Filière : Sciences Alimentaires

Spécialité : Agroalimentaire Et qualité Des Produits

Intitulé

Encapsulation d'extrait de myrte (*Myrtus communis*) en vue de l'enrichissement nutritionnel de cookies sans gluten

Présenté Par :

GHOUIL Yousra

SAFSAF Malak

SEDRATI Imane

SENOUSSI Meriem

Membre de Jury :

Mme. LEULMI Imene	M.A.A Examinatrice	Univ. Du 20 Août 1955 – Skikda
Mme. LAIB Imen	M.C.A Promoteur	Univ. Du 20 Août 1955 – Skikda
Mme. BÉCHIRI Loubna	M.C.A Présidente	Univ. Du 20 Août 1955 – Skikda

Année universitaire 2025/2026

Remerciements

Avant tout, nous remercions Allah le Tout-Puissant de nous avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre promotrice, Mme LAIB I., qui a accepté de nous encadrer. Nous la remercions sincèrement pour ses précieux conseils, son accompagnement constant, sa disponibilité, sa patience ainsi que pour la confiance qu'elle nous a accordée tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury qui nous font l'honneur d'évaluer ce travail : Mme. BÉCHIRI Loubna, pour avoir accepté de présider ce jury, ainsi que Mme. LEULMI Imane, pour avoir bien voulu examiner ce mémoire et apporter son regard scientifique.

Nous adressons aussi notre plus profonde reconnaissance à nos parents pour leur amour inconditionnel, leur confiance, leurs sacrifices, leur soutien indéfectible et leurs encouragements qui nous ont accompagnés tout au long de notre parcours.

Enfin, nous remercions chaleureusement toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration et à l'aboutissement de ce travail.

Dédicace 1

Je dédie ce modeste travail,

À mon cher père **Aïssa**, pour son soutien, ses sacrifices et ses encouragements tout au long de mon parcours.

À ma très chère mère **Salima**, pour son amour, sa tendresse, ses prières et sa présence inestimable à mes côtés.

À ma sœur bien-aimée **Lamis**, qui a toujours été mon soutien dans tous les moments de ma vie.

À mes chers frères **Islam** et **Assil**, avec toute mon affection et mes vœux de réussite.

À mes chères cousines, avec toute mon affection et mes meilleurs vœux de bonheur et de réussite. Une pensée particulière à **Soudjoud**, qui a toujours été la plus proche de moi durant mon parcours universitaire.

À mes chères collègues et partenaires de mémoire **Malak**, **Yousra** et **Imane**, en souvenir des efforts, des défis et des moments partagés tout au long de cette expérience.

À ma chère amie **Chahd**, pour son amitié sincère, sa présence et son soutien précieux.

À ma très chère **Mélissa**, amie fidèle et sœur de cœur, pour son affection, son soutien et tous les moments partagés.

Enfin, à tous ceux qui me portent dans leurs prières, me souhaitent le bien et ont contribué de près ou de loin à mon épanouissement et à ma réussite.

Meriem

DEDICACE 2

Après plusieurs années d'efforts et de persévérance, j'arrive aujourd'hui au terme de mon parcours universitaire et je dédie ce modeste travail:

À moi-même, qui ai cru en mon rêve, ai persévéré malgré les difficultés et ai poursuivi mon chemin jusqu'à atteindre cette étape avec fierté.

À mes très chers parents, **"Katia et Mourad**, "qui ont toujours été mon soutien et ma force. Merci pour votre amour, vos sacrifices et vos prières, qui ont été la clé de ma réussite.

À mes chères sœurs,**"Oumnia et Wiam",** merci pour votre soutien constant et votre présence à mes côtés tout au long de ces années.

À mes chères amies, **"Abir, Sirine, Nada et Nahla"**, vous avez été les meilleures compagnes de route. Merci d'avoir allégé les moments de fatigue.

À ma compagne de parcours universitaire, **Meriem**, avec qui j'ai partagé 6 années d'études, de défis et de réussites. Aujourd'hui, nous sommes heureuses de voir ensemble le fruit de ce parcours.

À mes collègues de ce travail, **Imane** et **Yousra**, j'adresse mes sincères remerciements pour leur soutien, leur aide précieuse et leur encouragement tout au long de la réalisation de ce mémoire.

À **"Hafida et Amine"**, merci pour vos efforts, votre dévouement au service des étudiants, ainsi que pour toute l'aide et le soutien que vous m'avez particulièrement apportés.

Enfin, à toutes les personnes qui m'ont soutenue ou aidée durant la réalisation de ce mémoire, je dédie ce travail en signe de gratitude et de reconnaissance.

Malak

DEDICACE 3

Avant tout, je remercie Allah de m'avoir accordé la patience, la force, le courage et la volonté nécessaires pour atteindre mon objectif.

Je dédie ce modeste travail à tous ce qui en participe à ma réussite :

À mon cher père, qui a consenti les plus grands sacrifices pour mon bien-être et ma réussite, et qui a toujours été mon soutien et mon guide à chaque étape de mon parcours. Merci pour les valeurs de patience, de persévérance et de travail que tu as su m'inculquer. Que Allah te protège, t'accorde une bonne santé

À ma chère mère, Celle qui m'a portée, protégée et entourée de son amour et de sa tendresse. Merci pour ta patience, tes sacrifices et ton soutien indéfectible. Que Allah vous bénisse pour la vie.

À mes chères sœurs, Ibtissem et **Ikhlace** pour leur soutien, leurs encouragements et leur affection sincère, qui ont toujours été une source de force et de bonheur.

à ma famille, à mes amies et à toutes les personnes qui m'ont soutenue et encouragée tout au long de mes études. Merci d'avoir cru en moi et de m'avoir accompagnée dans cette aventure.

En fin, je remercie **mes collègues** dans ce travail, pour vos efforts et votre patience.

Imene

DEDICACE 4

Avant tout, je remercie Allah le Tout-Puissant de m'avoir accordé la patience, la force, le courage et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail et atteindre mon objectif.

Je dédie ce modeste travail à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à ma réussite.

À mon cher père, qui a consenti les plus grands sacrifices pour mon bien-être et ma réussite, et qui a toujours été mon soutien et mon guide à chaque étape de mon parcours. Merci pour les valeurs de patience, de persévérance et de travail que tu m'as transmises. Qu'Allah te protège et t'accorde une longue vie pleine de santé et de bonheur.

À ma chère mère, celle qui m'a portée, protégée et entourée de son amour et de sa tendresse. Merci pour ta patience, tes sacrifices et ton soutien indéfectible. Qu'Allah te bénisse et te récompense pour tout ce que tu as fait pour moi.

À ma chère sœur, pour son affection, ses encouragements et sa présence constante, qui ont toujours été une source de force et de motivation.

À mon cher frère, pour son soutien, sa bienveillance et les moments de fraternité partagés tout au long de mon parcours.

À mes chères cousines jumelles, pour leur affection, leur gentillesse et les merveilleux souvenirs que nous partageons. Je leur souhaite beaucoup de réussite et de bonheur dans leur vie.

À toute ma famille, pour leur amour, leurs prières et leurs encouragements précieux.

À mes amies, qui ont partagé avec moi les joies, les difficultés et les moments inoubliables de ces années d'études.

Enfin, **à mes collègues de travail**, pour leurs efforts, leur patience, leur collaboration et les agréables moments passés ensemble durant la réalisation de ce mémoire.

À tous ceux qui ont cru en moi et m'ont soutenue tout au long de cette aventure, je présente ma profonde gratitude.

Yousra

Table de Matières

Résumé

Liste des Abréviations

Liste des Tableaux

Liste des Figures

Introduction 1

CHAPITRE 1 *Myrtus communis* Linn.

1. Généralité 3
2. Usages médicinaux et autres 4
3. Constituants phytochimiques 5
4. Composition phénolique de *Myrtus communis* 7
   4.1 Définition et classification des composés phénoliques 7
   4.2 Principaux composés phénoliques identifiés dans *Myrtus communis* 8
5. Activités pharmacologiques 9
   5.1 Antimicrobienne 9
   5.2 Antifongique 10
   5.3 Activité contre *Trichomonas vaginalis* 10
   5.4 Antimolluscicide 11
   5.5 Insecticide 11
   5.6 Anti-inflammatoire 11
   5.7 Antioxydante 12
   5.8 Effet protecteur sur le cholestérol et les lipoprotéines de basse densité (LDL) humaines 12
   5.9 Antidiabétique 12
   5.10 Antimutagène 13
   5.11 Induction de l'apoptose dans les cellules cancéreuses 13

CHAPITRE 2 Micro-encapsulation des composés phénoliques

1. Généralités 15
2. Caractéristiques de *Saccharomyces cerevisiae* 16
3. La cellule de levure comme microcapsule potentielle 18
   3.1 Microencapsulation des composés bioactifs dans la cellule de levure 18
      3.1.1 Méthode de plasmolyse 20
      3.1.2 Méthode d'autolyse 21
      3.1.3 Méthode d'émulsion 22

3.1.4 Infusion sous vide 22
3.1.5 Traitement ultrasonique 23
3.1.6 Méthode des champs électriques pulsés (PEF) 24
4. Efficacité de la micro encapsulation 25
4.1 Stabilité thermique 25
4.2 Stabilité des composés bioactifs lors du stockage 26
4.3 Activité antioxydante 26
4.4 Solubilité 27
4.5 Libération des composés bioactifs dans les sites cibles et l'environnement digestif 27

CHAPITRE 3 Cookies sans gluten

1. Généralité 29
2. Matières premières utilisées dans les cookies sans gluten 29
2.1 Amidons 29
2.2 Légumineuses 30
2.3 Fibres 30
2.4 Hydrocolloïdes 31
2.5 Sucres 31
2.6 Lipides 32
3. Les propriétés technologiques 32
4. Propriétés sensorielles 32
5. Propriétés nutritionnelles 33

MATERIEL ET METHODES

1. Matériel végétal 36
2. Encapsulation des composés phénoliques dans les souches de levure *Saccharomyces cerevisiae* 37
2.1 Culture de la souche de levure Saccharomyces cerevisiae 37
2.2 Plasmolyse des souches de levures 37
2.3 Microencapsulation des composés phénoliques 38
2.4 Efficacité d'encapsulation 38
3. Dosage des composés phénoliques 38
3.1 Dosage des polyphénols totaux 38
3.2 Dosage des flavonoïdes 39
4. Évaluation de l'effet de la microencapsulation sur l'activité antioxydante 39
4.1 Méthode DPPH 39
5. Élaboration des cookies sans gluten fonctionnelles à base de microcapsules d'extraits phénoliques de myrte 40

5.1 Matières premières 40
5.2 Formulation des cookies sans gluten 40
5.3 Protocole de formulation 42
6. La caractérisation de formulation des cookies sans gluten 45
6.1 Dosage des polyphénols 45
6.2 Dosage des flavonoïdes 45
6.3 Activités antioxydante 45
7. Analyse physico-chimique 45
7.1 Activité de l'eau (aw) 45
7.2 pH 46
7.3 Extrait sec soluble (°Brix) 46
7.4 Teneur en humidité (H%) 46
7.5 Teneur en cendres totales 46
8. Analyse nutritionnelle 47
8.1 Teneur en protéines 47
8.1.1 Minéralisation 47
8.1.2 Distillation 47
8.1.3 Titrage 48
8.2 Teneur en lipides 48
8.3 Teneur en glucides 49
8.4 Valeur calorique 49
9. Analyse sensorielle des cookies sans gluten 49

RESULTATS ET DISCUSSION

1. Teneurs en composés phénoliques 51
1.1 Effet de la microencapsulation sur la teneuren composés phénoliques de *Myrtus communis* L 51
1.2 Effet de l'enrichissement en extrait sur les teneurs en composés phénoliques des cookies sans gluten 53
2. Teneurs en flavonoides 56
2.1 L'effet de la microencapsulation sur la teneur en flavonoïdes de *Myrtus communis* L. 56
2.2 Effet de l'enrichissement en extrait sur les teneurs en flavonoïdes des cookies sans gluten 59
3. Activité antioxydante 62
3.1 Effet de la microencapsulation sur l'activité antioxydante des extraits de *Myrtus communis* L.62
3.2 Effet de la microencapsulation sur l'activité antioxydante des cookies sans gluten enrichis en extrait de *Myrtus communis* L 63
4. Effet des différentes modalités de l'enrichissement par l'extrait de *Myrtus communis* sur les paramètres physicochimiques des cookies sans gluten 66

4.1 Humidité (%) 67
4.2 Activités de l'eau (aw) 67
4.3 pH 68
4.4 Cendres (% MS) 69
5. Effet des différentes modalités d'enrichissement sur les propriétés nutritionnelles des cookies sans gluten 69
5.1 Protéines 70
5.2 Lipides 71
5.3 Glucides 71
5.4 Valeur énergétique 72
6. Effet des différentes modalités d'enrichissement sur les propriétés organoleptiques 73
Conclusion 79
Références bibliographiques .....
Anexxes

Résumé

Cette étude s'inscrit dans le cadre du développement d'aliments fonctionnels sans gluten enrichis en composés bioactifs naturels. Les baies de *Myrtus communis* L., reconnues pour leur richesse en polyphénols et leur fort potentiel antioxydant, ont été utilisées comme source d'extraits bioactifs. Afin d'améliorer la stabilité de ces composés et de faciliter leur incorporation dans une matrice alimentaire, l'extrait a été microencapsulé dans des cellules de *Saccharomyces cerevisiae* plasmolysées et non plasmolysées.

Les formulations obtenues ont été incorporées dans des cookies sans gluten et comparées à un témoin non enrichi. L'évaluation a porté sur la teneur en composés phénoliques ainsi que sur l'activité antioxydante des différentes formulations. Les résultats ont montré que la microencapsulation améliore la protection des composés bioactifs et permet une meilleure conservation de leur activité. Les cookies enrichis avec l'extrait encapsulé, particulièrement l'extrait encapsulé plasmolysé, ont présenté les valeurs les plus élevées en activité antioxydante et en composés phénoliques.

Ces résultats démontrent l'intérêt de la microencapsulation par les cellules de levure pour la valorisation des extraits naturels riches en antioxydants et leur application dans la formulation de produits sans gluten à haute valeur nutritionnelle.

Mots-clés : *Myrtus communis* L., microencapsulation, *Saccharomyces cerevisiae*, polyphénols, activité antioxydant, cookies sans gluten

Abstract

This study focuses on the development of functional gluten-free foods enriched with natural bioactive compounds. Berries of *Myrtus communis* L., known for their high content of polyphenols and antioxidant compounds, were used as a source of bioactive extracts. To improve the stability and protection of these compounds, the extract was microencapsulated using plasmolyzed and non-plasmolyzed *Saccharomyces cerevisiae* cells.

The obtained formulations were incorporated into gluten-free cookies and compared with a control formulation. The evaluation was based on total phenolic content and antioxidant activity. The results showed that microencapsulation enhanced the protection of bioactive compounds and improved their retention during processing. Cookies enriched with encapsulated extract, especially the plasmolyzed encapsulated extract, exhibited the highest antioxidant activity and phenolic content.

These findings highlight the potential of yeast-cell microencapsulation as an effective strategy for preserving natural antioxidants and developing gluten-free bakery products with improved nutritional and functional properties.

Keywords: *Myrtus communis*, microencapsulation, *Saccharomyces cerevisiae*, polyphenols, antioxidant activity, gluten-free cookies.

ملخص

تندرج هذه الدراسة ضمن إطار تطوير أغذية وظيفية خالية من الغلوتين ومدعمة بالمركبات الحيوية الطبيعية. تم استعمال ثمار الآس (Myrtus communis (L. المعروفة بغناها بالمركبات الفينولية ومضادات الأكسدة كمصدر للمستخلصات الحيوية. ومن أجل تحسين ثبات هذه المركبات وحمايتها أثناء المعالجة الغذائية، تم تغليف المستخلص دقيقًا سواء كانت مبلزمة أو غير مبلزمة .

باستعمال خلايا الخميرة (Saccharomyces cerevisiae) أُدمجت المستخلصات المغلفة في تركيبات من الكوكيز الخالي من الغلوتين وقورنت بعينة شاهدة غير مدعمة. شملت الدراسة تقييم محتوى المركبات الفينولية والنشاط المضاد للأكسدة لمختلف التركيبات. أظهرت النتائج أن التغليف الدقيق ساهم في حماية المركبات الحيوية والحفاظ على فعاليتها بشكل أفضل. كما سجلت عينات الكوكيز المدعمة بالمستخلص المغلف، خاصة المستخلص المغلف باستعمال الخلايا المبلزمة، أعلى القيم من حيث النشاط المضاد للأكسدة ومحتوى المركبات الفينولية .

تؤكد هذه النتائج أهمية تقنية التغليف الدقيق بواسطة خلايا الخميرة في تثمين المستخلصات النباتية الطبيعية الغنية بمضادات الأكسدة وتطوير منتجات خالية من الغلوتين ذات قيمة غذائية ووظيفية مرتفعة .

الكلمات المفتاحية :الآس، التغليف الدقيق، خميرة الخبز، المركبات الفينولية، النشاط المضاد للأكسدة، كوكيز خالٍ من الغلوتين.

Liste des abréviations

% :	Pourcentage
Aw:	water activity
Abs:	Absorbance
AH:	Antioxydant donneur d'Hydrogène
ABTS:	2,2'-Azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)
ANOVA :	Analysis of Variance
°C. :	Degré Celsius
Cm :	Centimètre
DO :	Densité Optique
DPPH :	2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle
EE :	L'Efficacité d'Encapsulation
EQ :	Equivalent quercétine
ES :	Système endocrinien
GRAS :	Generally Recognized As Safe
H% :	humidité
Kcal :	kilocalorie
Kg :	kilogramme
M :	la concentration molaire (la molarité)
mg :	Milligramme
mL :	Millilitre
MS :	Matière sèches
NaCl :	Chlorure de sodium
Na_2CO_3 :	Carbonate de sodium
nm :	Nanomètre

PEBD : Polyéthylène basse densité

PH : Potentiel hydrogéne

TPE : La concentration totale de polyphénols, flavonoïdes et tanins encapsulés

TPT : la concentration de composés phénoliques (polyphénols, flavonoïdes et tanins) de l'extrait non encapsulé

UV : Ultra violet

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification structurale et exemples représentatifs des principaux composés phénoliques ……... 7

Tableau 2 : Rôle des techniques d'encapsulation par les cellules de levure sur les composés bioactifs naturels……... 19

Tableau 3 : Ingrédients utilisés pour la formulation des cookies sans gluten (exprimés en grammes pour 100 g de farines totales, sauf mention contraire)……. 42

Tableau 4 : Teneurs en polyphénols totaux (mg EAG/g d'extrait sec) des cookies sans gluten enrichis par différentes formes d'extrait de *Myrtus communis* L. à diverses concentrations d'incorporation…… 54

Tableau 5 : Teneurs en flavonoïdes (mg EQ/g ES) des cookies sans gluten enrichis par différentes formes d'extrait de *Myrtuscommunis* L.…… 58

Tableau 6 : Effet du mode d'encapsulation et du taux d'incorporation de l'extrait de *Myrtuscommunis* sur l'activité antioxydante (% d'inhibition du DPPH) des cookies sans gluten…….. 63

Tableau 7 : Impact des différentes formes d'incorporation de l'extrait de *Myrtuscommunis* sur les propriétés physicochimiques des cookies sans gluten…….. 65

Tableau 8 : Impact des différentes formes d'incorporation de l'extrait de *Myrtus* sur la composition nutritionnelle des cookies sans gluten….. 69

Tableau 9 : Évaluation de l'aspect macroscopique des coockies formulations témoins et enrichies en extrait encapsulé…… 73

Liste des figures

Figure 1 : *Myrtus communis* Linn…….. 1

Figure 2 : Structures chimiques des polyphénols les plus identifiés dans les différents extraits de Myrtus communis L……... 8

Figure 3 : Efficacité de la microencapsulation des composés bioactifs par la cellule de levure…… 16

Figure 4 : Enveloppe cellulaire de *Saccharomyces cerevisiae*…….. 16

Figure 5 : Étapes de la microencapsulation des composés bioactifs dans les cellules de levure…….…... 17

Figure 6 : Illustration du processus de plasmolyse……... 19

Figure 7 : Illustration du processus d'autolyse …… 21

Figure 8 : Illustration du procédé à base d'émulsion …….. 22

Figure 9 : Illustration du procédé d'infusion sous vide ……... 22

Figure 10 : Illustration du procédé par ultrasons ……... 23

Figure 11 : Évolution des biscuits : de la composition nutritionnelle actuelle vers des formulations améliorées et des procédés innovants …… 34

Figure 12 : Ocimum basilicum……... 37

Figure 13 : Teneur en polyphénols totaux des différents extraits (intact, plasmolysé et libre) …… 48

Figure 14 : Teneur totale en flavonoïdes de l'extrait de *Myrtuscommunis*(L.) avant et après microencapsulation …… 51

Figure 15 : Activité antioxydante (% d'inhibition du DPPH) ……... 59

Figure 16 : Profil sensoriel des cookies sans gluten enrichis en extrait de *Myrtus communis*.....75

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Au cours des dernières décennies, l'évolution des habitudes alimentaires et la sensibilisation accrue des consommateurs à l'impact de l'alimentation sur la santé ont favorisé l'émergence d'une nouvelle génération d'aliments à valeur ajoutée, associant qualité nutritionnelle et bénéfices fonctionnels. Dans ce contexte, les produits sans gluten ont connu un développement considérable, principalement en raison de leur rôle indispensable dans l'alimentation des personnes atteintes de la maladie cœliaque ou d'une sensibilité au gluten (Leonard *et al*., 2017). Malgré cet essor, ces produits présentent fréquemment des déséquilibres nutritionnels liés à l'utilisation d'ingrédients raffinés, se traduisant par de faibles teneurs en protéines, minéraux, fibres alimentaires et composés bioactifs, ainsi que par une densité énergétique relativement élevée (Belli *et al*., 2016). L'amélioration de leur qualité nutritionnelle et fonctionnelle constitue ainsi un enjeu majeur pour la recherche et l'industrie agroalimentaire (Lukinac *et al*., 2026 ; Karaman *et al*., 2025 ; Dossa *et al*., 2023 ; Aljobair, 2022).

Dans cette perspective, l'incorporation de composés bioactifs d'origine végétale représente une stratégie prometteuse pour enrichir les aliments et renforcer leurs propriétés bénéfiques pour la santé (Xiao, 2022). Parmi les ressources végétales d'intérêt, *Myrtus communis* L., espèce emblématique du bassin méditerranéen et largement distribuée en Algérie, se distingue par sa richesse en métabolites secondaires, notamment en polyphénols, flavonoïdes, anthocyanes et tanins (Mërtiri *et al*., 2025). Ces composés sont reconnus pour leurs puissantes propriétés antioxydantes ainsi que pour leurs activités biologiques variées (Mërtiri *et al*., 2025 ; Xiao, 2022). Toutefois, leur exploitation dans les systèmes alimentaires reste limitée en raison de leur instabilité au cours des procédés technologiques et du stockage (Oancea, 2021 ; Chen *et al*., 2022 ; Xiao, 2022).

Parallèlement, les cookies sans gluten constituent l'un des produits de boulangerie les plus appréciés par les consommateurs en raison de leur praticité, de leur longue durée de conservation et de leur large acceptabilité sensorielle (Aljobair, 2022 ; Karaman *et al*., 2025). Leur formulation offre également un support idéal pour l'incorporation d'ingrédients fonctionnels et de composés bioactifs (Dossa *et al*., 2023 ; Lukinac *et al*., 2026). L'enrichissement de ces produits par des extraits végétaux riches en polyphénols représente ainsi une approche innovante permettant non seulement d'améliorer leur valeur nutritionnelle, mais également d'augmenter leur potentiel antioxydant (Chernenko, 2025). Néanmoins, l'introduction directe de ces composés peut affecter leur stabilité ainsi que certaines caractéristiques physicochimiques et sensorielles du produit final, notamment en raison des

contraintes imposées par les traitements thermiques de cuisson (Oancea, 2021 ; Chen et al., 2022 ; Chernenko, 2025).

Afin de surmonter ces limitations, la microencapsulation s'impose comme une technologie particulièrement adaptée pour protéger les molécules bioactives contre les facteurs de dégradation, améliorer leur stabilité et favoriser leur incorporation dans les matrices alimentaires (Coradello et Tirelli, 2021 ; Tan *et al*., 2021 ; Chernenko, 2025). Parmi les différents systèmes d'encapsulation étudiés, les cellules de Saccharomyces cerevisiae présentent de nombreux avantages liés à leur caractère naturel, biodégradable, non toxique et économiquement accessible (Coradello et Tirelli, 2021 ; Tan *et al*., 2021). Leur structure cellulaire complexe leur permet d'assurer une protection efficace des composés encapsulés tout en facilitant leur intégration dans les aliments (Dadkhodazade *et al*., 2018 ; Kavosi *et al*., 2018 ; Günal-Köroğlu *et al*., 2024).

De plus, les traitements de plasmolyse augmentent la capacité d'encapsulation grâce aux modifications structurales induites au niveau de la membrane et de la paroi cellulaires (Zade Ashkezary *et al*., 2024 ; Laib *et al*., 2026). Plusieurs travaux ont également démontré l'efficacité des cellules de levure dans l'encapsulation des polyphénols végétaux, notamment ceux issus de *Myrtus communis*, en améliorant leur stabilité et leur activité antioxydante (Semouma *et al*., 2024 ; Aktürk Gümüşay *et al*., 2025).*

Dans ce cadre, la présente étude vise à valoriser les composés phénoliques extraits des baies de *Myrtus communis* à travers leur microencapsulation dans des cellules de Saccharomyces cerevisiae intactes et plasmolysées, puis à évaluer leur potentiel denrichissement de cookies sans gluten. Lobjectif est détudier lefficacité du procédé dencapsulation et danalyser son impact sur les propriétés antioxydantes, physicochimiques, nutritionnelles et sensorielles des produits élaborés.

Le présent mémoire est structuré en trois parties complémentaires. La première partie est consacrée à une synthèse bibliographique portant sur *Myrtus communis*, les composés phénoliques et les technologies de microencapsulation utilisant les cellules de levure. La deuxième partie décrit le matériel et les méthodes expérimentales mis en uvre pour la réalisation de cette étude. Enfin, la troisième partie présente les résultats obtenus ainsi que leur analyse et leur discussion à la lumière des connaissances scientifiques actuelles.

CHAPITRE 1

Myrtus communis Linn.

CHAPITRE 1 *Myrtus communis* Linn

1. Généralité

Myrtus communis Linn, appartenant à la famille des Myrtaceae est un arbuste aromatique vivace à feuillage persistant, atteignant généralement 1,8 à 2,4 m de hauteur, caractérisé par un port dense et une écorce fissurée **(figure 1)**. Son aire de distribution originelle couvre l'Europe méridionale, l'Afrique du Nord et l'Asie occidentale**,** avec une large expansion dans le bassin méditerranéen. L'espèce est également signalée dans d'autres régions (Amérique du Sud, Himalaya nord-occidental, Australie) et cultivée, notamment en Inde, pour ses fleurs odorantes (Nadkarni, 1989). Sur le plan historique et étymologique, le terme *Myrtus* dérive du grec désignant le myrte, tandis que *communis* souligne son caractère commun. L'espèce est mentionnée dans des textes anciens (Néhémie) et décrite par Linné en 1753 ; elle est également rapportée dans les œuvres médicales antiques et arabe (Kirtikar et Basu, 1988 ; Stuart, 1994).



Figure 1 : *Myrtus communis* Linn

Morphologiquement, la plante présente une tige dressée (jusqu'à 3 m) formant un houppier compact. Les feuilles sont persistantes, opposées, coriaces, glabres et luisantes**,** de forme ovale à lancéolée (2,5–3,8 cm). Les fleurs, blanches, axillaires et parfumées**,** mesurent environ 2 cm de diamètre et possèdent des anthères jaunes. Les fruits sont des baies orbiculaires à ovoïdes (0,7–1,2 cm)**,** de couleur variant du vert au rouge puis au bleu-noir (ou blanc) à maturité, renfermant des graines réniformes à tégument sclérifié ; leur saveur évolue d'amère à sucrée. D'un point de vue écologique, *M. communis* est une espèce xérophile

tolérante à la sécheresse**,** nécessitant des apports hydriques modérés. Elle s'adapte à divers milieux (ensoleillés ou ombragés) jusqu'à 800 m d'altitude, avec une floraison estivale (Maheshwari et Singh, 1965).

2. Usages médicinaux et autres

La littérature ethno-pharmacologique attribue aux baies un large éventail d'indications. Celles-ci sont réputées pour leurs propriétés antiseptiques, astringentes (Nadkarni, 1989), carminatives (Nadkarni, 1989 ; Kirtikar et Basu, 1988 ; Council of Scientific et Industrial Research, 1962), émménagogues (Nadkarni, 1989 ; Kirtikar et Basu, 1988), démultiplantes, desséchantes, analgésiques, toniques capillaires, hémostatiques (Baitar, 1999), antiémétiques, lithotritiques (Ghani, 1920), cardiotoniques, diurétiques (Kirtikar et Basu 1988 ; Ghani, 1920 ; Kabiruddin, 1951), anti-inflammatoires (Hakeem, 1895), stomachiques, toniques cérébrales (Kirtikar et Basu, 1988 ; Ghani, 1920), néphroprotectrices, antidiaphorétiques (Kabiruddin, 1951), ainsi que pour leur effet antidiabétique (Trease et Evans, 2006). S'y ajoute une activité antidote (Hakeem, 1895).

Le feuillage de *Myrtus communis* L. se voit reconnaître des effets astringents, antiseptiques (Nadkarni, 1989), hypoglycémiants, laxatifs (Trease et Evans, 2006), analgésiques (Kirtikar et Basu, 1988 ; Kabiruddin, 1951), hémostatiques (Kabiruddin, 1951), toniques capillaires (Baitar, 1999 ; Ali et Ansari, 1994) et stimulants (Nadkarni, 1989). Quant à l'appareil racinaire, des travaux rapportent une activité de nature antibactérienne (Agarwal, 1986).

L'espèce considérée occupe une position prépondérante au sein des pharmacopées traditionnelles où elle est reconnue pour ses propriétés antiseptiques, désinfectantes et hypoglycémiantes (Elfellah *et al*. 1984). Ses différentes parties végétales sont également valorisées dans les domaines agroalimentaires, notamment pour l'aromatisation des préparations carnées et des sauces, ainsi que dans l'industrie cosmétique (Chalchat *et al.* 1998). En médecine populaire, les décoctions préparées à partir des feuilles et des fruits sont employées pour leurs effets stomachiques, hypoglycémiants et antimicrobiens. Elles interviennent également dans la prise en charge de diverses affections, notamment la toux, les troubles bucco-dentaires, la constipation et certaines manifestations hémorragiques. En usage externe, ces préparations favorisent la cicatrisation des lésions cutanées (Serce *et al.*, 2010).

L'huile essentielle issue des feuilles est largement utilisée comme agent antiseptique et désinfectant, notamment dans certains établissements hospitaliers parisiens pour le traitement des pathologies respiratoires et vésicales. Elle était également appliquée localement dans les affections rhumatismales (Nadkarni, 1989 ; Stuart, 1994 ; Council of Scientific et Industrial Research, 1962). En parallèle, la décoction de fruits était destinée aux soins dermatologiques des nouveau-nés, tandis que l'association feuilles-fruits servait au nettoyage des plaies. Actuellement, l'usage de la décoction de feuilles persiste, notamment dans les lavages vaginaux, les lavements intestinaux et le traitement de certaines infections respiratoires (Hakeem, 1895). Enfin, une huile fixe extraite des baies est exploitée pour ses propriétés toniques capillaires, contribuant au renforcement et à la stimulation de la croissance des cheveux (Nadkarni, 1989 ; Ali et Ansari, 1994 ; Council of Scientific et Industrial Research, 1992).

La consommation de myrte pourrait présenter un intérêt nutritionnel du fait de sa richesse en composés antioxydants, lesquels participent à la protection contre la peroxydation lipidique et à la neutralisation des radicaux libres (Serce *et al.*, 2010). Historiquement, les fruits arrivés à maturité étaient intégrés à l'alimentation comme compléments nutritifs en raison de leur haute teneur en vitamines (Chopra *et al.*, 1956). Selon les sources de la médecine unanie, la posologie thérapeutique des baies se situe entre 3 et 5 grammes (Ghani, 1920 ; Hakeem, 1895). Les baies sont indiquées dans un large spectre de pathologies : dans les troubles gastro-intestinaux (Chandpuri, 1988), les pathologies inflammatoires et infectieuses (bronchite, rhinite, rectite, conjonctivite, états inflammatoires) (Baitar, 1999), ainsi que dans diverses affections hémorragiques (épistaxis, hémorragies, ménorragie, hémoptysie) (Kabiruddin, 1951). Par ailleurs, les baies interviennent dans la prise en charge de troubles cutanéo-muqueux et locomoteurs, incluant les ulcérations, les brûlures, les entorses et fractures, ainsi que certaines affections dermatologiques telles que le mélasma, et chloasma et les pellicules (Baitar, 1999). Leur utilisation s'étend également aux troubles urogénitaux, aux affections bucco-dentaires, ainsi qu'à divers symptômes généraux, notamment la toux, la fièvre, les céphalées, les palpitations (Agarwal, 1986).

3. Constituants phytochimiques

Le spectre chimique de *Myrtus communis* se caractérise par la présence de fibres, de glucides, de substances antioxydantes et d'une diversité de métabolites à activité biologique

(Hayder *et al.,* 2004 ; Dogan, 1978). Au niveau des fruits, les composés phénoliques, les flavonoïdes et les anthocyanes représentent les familles chimiques prédominantes. Les graines renferment entre 12 et 15% d'une huile fixe, dont la fraction glycéridique est constituée d'esters d'acides oléique, linoléique, myristique, palmitique, linolénique et laurique (Council of Scientific and Industrial Research, 1962 ; Rastogi et Mehrotra, 1991). L'analyse du profil en acides gras des fruits fait état de 14 composés distincts, avec une nette prédominance de l'acide oléique (67,07%), suivi de l'acide palmitique (10,24%) et de l'acide stéarique (8,19%) (Serce *et al.,* 2010).

L'huile essentielle de *M. communis* est obtenue par hydrodistillation des feuilles, des rameaux, des fleurs et des fruits (Nadkarni, 1989 ; Council of Scientific and Industrial Research, 1962). Elle se présente sous la forme d'un liquide jaune à jaune verdâtre, doté d'une odeur fraîche caractéristique. Les rendements pondéraux (p/p) varient selon l'organe considéré : feuilles, 0,4–0,5 % ; fleurs, 0,4 % ; fruits immatures, 0,5 % ; fruits mûrs, 0,02 %. La fraction volatile est majoritairement composée de terpènes et d'alcools terpéniques (Giacomo, 1983). Cinq dérivés terpénoïdes ; à savoir l'acétate de myrtényle, le 1,8-cinéole, le limonène et le linalol , ont été identifiés dans les huiles issues des feuilles (0,19–0,37 %), des fruits (0,03–0,13 %) et des fleurs (0,21–0,26 %), avec des teneurs relatives variables selon l'organe (Jerkovic *et al*., 2002).

Les fruits renferment, selon les données de la littérature, une variété de composés : acides citrique et malique, résines, tanins, huile fixe (Nadkarni, 1989 ; Council of Scientific and Industrial Research, 1962), sucres (Nadkarni, 1989), flavonoïdes , arabinosides et glucosides d'anthocyanes (Montoro *et al.,* 2006), kaempférol , quercétine, myricétine-3-O-glucoside, myricétine-3,3-di-O-galactoside, myricétine-3-O-rutinoside, esculine, scopoline, acide caféique (Hinou *et al.,* 1988), myricétine-3-O-rhamnoside (myricitrine), esculétine-6-O-glucoside (esculine), hespérétine-7-O-rhamnoglucoside (hespéridine) et hespérétine-2-O-méthylchalcone-4-O-rhamnoglucoside (Martin *et al.,* 1999).

Le feuillage se caractérise par une richesse en tanins, flavonoïdes et coumarines (Diaz et Abeger, 1987), ainsi que par la présence de myrtucommulone A et B (Rastogi et Mehrotra, 1991), de semi myrtucommulone (Feisst *et al.*, 2005), de galloyl-glucosides, d'ellagitanins, d'acides galloyl-quiniques (Rastogi et Mehrotra, 1993), et des acides caféique, gallique et ellagique (Hinou *et al.,* 1988). Les racines ont quant à elles révélé la présence de tanins (Diaz et Abeger, 1986), d'alcaloïdes, de glycosides, de sucres réducteurs

(Satyavati *et al.,* 1987), d'huile fixe (Council of Scientific and Industrial Research, 1992), d'acide gallique, d'acides phénoliques, de quercétine et de patulétine (Diaz et Abeger, 1987).

4. Composition phénolique de *Myrtus communis*

4.1 Définition et classification des composés phénoliques

Les polyphénols représentent l'une des familles de métabolites secondaires les plus largement représentées et les plus structuralement diversifiées au sein du règne végétal **(Tableau 1)**. Ces composés sont distribués dans l'ensemble des tissus végétaux, et leur biosynthèse fait intervenir principalement deux voies métaboliques : celle du shikimate et celle de l'acétate-malonate (Tsao, 2010). Les polyphénols se définissent par la présence d'un ou de plusieurs cycles aromatiques substitués par des groupements hydroxyle (-OH). Leur classification distingue plusieurs catégories majeures, parmi lesquelles figurent les acides phénoliques, les flavonoïdes, les tanins, les stilbènes ainsi que les lignanes (Durazzo *et al.*, 2019 ; Singla *et al.,* 2019 ; Tijjani *et al.,* 2020). Au sein des flavonoïdes, on observe différentes sous-classes telles que les anthocyanines, les flavonols, les flavones et les isoflavones (Durazzo *et al.,* 2019 ; Singla et *al.,* 2019). La richesse structurale de ces composés est étroitement liée à la multiplicité de leurs fonctions biologiques. Ils interviennent notamment en tant qu'agents antioxydants, médiateurs anti-inflammatoires et protecteurs vis-à-vis du stress oxydatif, que ce soit dans les mécanismes physiologiques des végétaux ou par l'intermédiaire de l'alimentation, dans l'organisme humain (Zagoskina et *al.,* 2023). Les polyphénols font l'objet d'une exploitation courante dans les secteurs agroalimentaire et pharmaceutique. Leurs effets bénéfiques potentiels sur la santé humaine constituent par ailleurs un champ de recherche actif (Durazzo et *al.*, 2019).

Tableau 1 : Classification structurale et exemples représentatifs des principaux composés phénoliques **(Manach *et al.*, 2025)**.

Classe structurale	**Sous-classes principales**	**Exemples typiques**
Acides phénoliques	Hydroxybenzoïques (C6–C1); Hydroxycinnamiques (C6–C3)	Acide Vanillique, acide gallique, acide caféique, acide férulique, acide sinapique
Flavonoïdes	Flavonols, flavones, flavanones, isoflavones,	Quercétine, apigénine, naringénine, génistéine, catéchine,

	anthocyanes, flavan-3-ols	cyanidine
Stilbènes	Stilbènes simples	Resvératrol (issu du raisin, vin rouge)
Lignanes	Lignanes classiques	Matairésinol, sécoisolaricirésinol (graines, céréales)
Tannins	Tannins hydrolysables et condensés (proanthocyanidines)	Ellagitanins, procyanidines (noix, thé, fruits)
Autres phénols simples	coumarines, xanthones, phénylethanoïdes	Tyrosol, hydroxytyrosol, curcuminoïdes, xanthones

4.2 Principaux composés phénoliques identifiés dans *Myrtus communis* L.

Myrtus communis L. se distingue par une teneur élevée en métabolites polyphénoliques, principalement localisés dans les feuilles et les fruits. La diversité chimique de cette espèce englobe plusieurs classes de composés, notamment les acides phénoliques, les flavonoïdes (parmi lesquels la quercétine et la myricétine), les flavanols, les tanins ainsi que les anthocyanes. L'analyse comparative des organes révèle des profils distincts. Dans les baies, les dérivés majoritairement identifiés correspondent à la myricétine-3-O-arabinoside et à la myricétine-3-O-galactoside. En revanche, le feuillage se singularise par une abondance de glycosides de type flavonolique et de dérivés galloylés (Barboni *et al*., 2010 ; Kurkin *et al*., 2021).

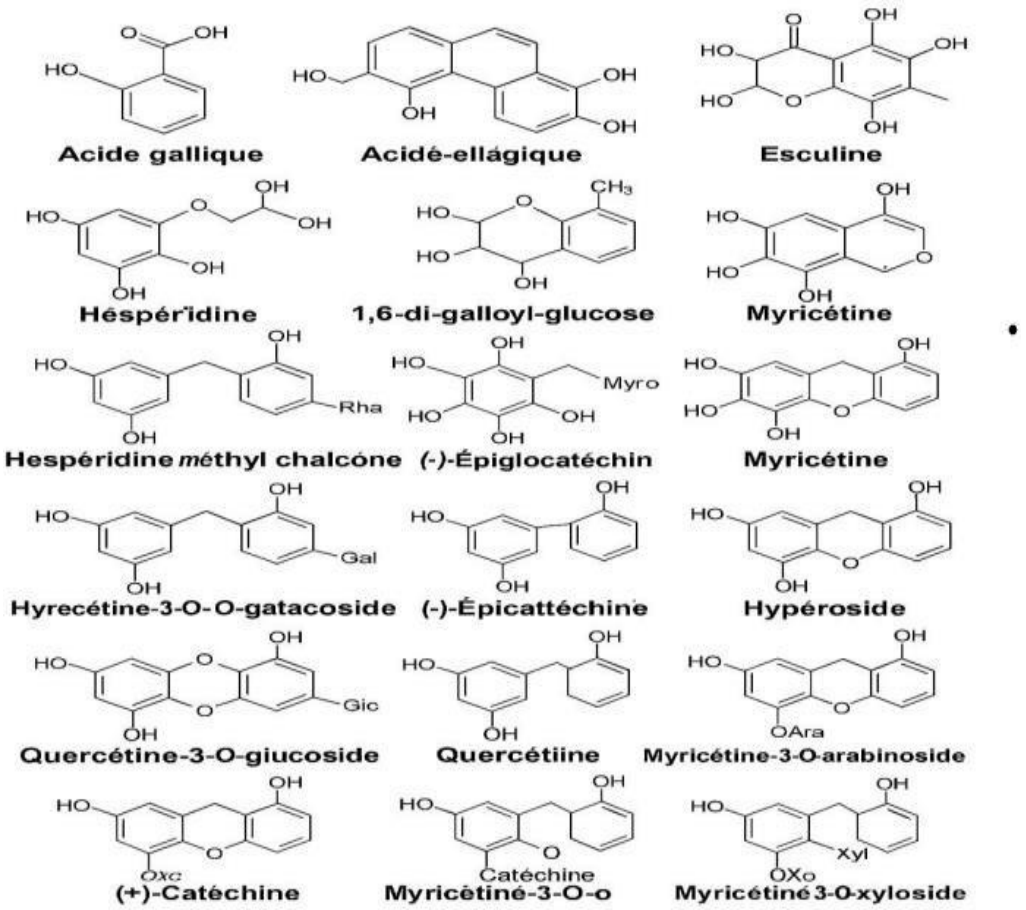


Figure 2 : Structures chimiques des polyphénols les plus identifiés dans les différents extraits de *Myrtus communis* L. (Bouchenak *et al.*, 2020).

5. Activités pharmacologiques

5.1 Antimicrobienne

L'activité antimicrobienne d'un extrait brut de *Myrtus communis* a été évaluée sur plusieurs souches bactériennes, incluant *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Proteus vulgaris*, *P. mirabilis*, *Klebsiella aerogenes*, *Salmonella typhi* et *Shigella* spp., mettant en évidence une activité inhibitrice notable en accord avec l'usage traditionnel de la plante comme agent anti-infectieux (Alem *et al.*, 2008).

L'activité antibactérienne d'un extrait méthanolique brut de *M. communis* a également été testée sur dix souches de référence, comprenant des bactéries à Gram positif et à Gram négatif, avec une inhibition de la croissance de l'ensemble des micro-organismes testés, à l'exception de *Campylobacter jejuni* (Mansouri *et al.*, 2001).

Une étude portant sur l'activité antimicrobienne de *M. communis* sur sept souches pathogènes, incluant des bactéries à Gram positif et à Gram négatif, a montré une inhibition efficace de l'ensemble des souches testées, confirmée par la méthode de dilution en milieu gélosé (Akin *et al.,* 2010).

L'activité antibactérienne d'extraits aqueux foliaires de *M. communis* contre *Pseudomonas aeruginosa* a été évaluée par mesure des zones d'inhibition et détermination des CMI, avec comparaison à six antibiotiques de référence, révélant une inhibition marquée de la croissance bactérienne d'une intensité comparable à celle des antibiotiques testés (Al-Saimary *et al.,* 2002).

Une activité antibactérienne notable a été mise en évidence pour une fraction glycosidique polaire des feuilles, attribuée à la gallomyrtucommulone, tandis que l'huile essentielle de myrte a montré une efficacité marquée contre *Escherichia coli, Staphylococcus aureus* et *Candida albicans*, ainsi qu'une activité contre *Mycobacterium tuberculosis* et *Helicobacter pylori* (Yadegarinia *et al.,* 2006 ; Zanetti *et al.,* 2010).

Des extraits de feuilles et de baies obtenus à partir de différents solvants (méthanol, éthanol, acétate d'éthyle) ont également montré une activité antibactérienne élevée contre *Listeria monocytogenes* et *Pseudomonas aeruginosa*, confirmée par une réduction significative du temps de survie cellulaire (Amensour *et al.,* 2010).

5.2 Antifongique

Des essais conduits in vitro ont montré qu'à une concentration de 1600 ppm, l'huile essentielle réduisait de 60 % le développement de *Rhizoctonia solani* (Curini *et al.,* 2003). Par ailleurs, l'évaluation des propriétés antifongiques de cette même huile vis-à-vis d'espèces du genre *Aspergillus*, réalisée selon le protocole de microdilution en milieu liquide, a démontré une efficacité sur l'ensemble des souches examinées (Mohammadi *et al.,* 2008).

5.3 Activité contre Trichomonas vaginalis

Une étude menée chez trois patientes non enceintes infectées par *Trichomonas vaginalis* a évalué l'efficacité de la doxycycline (200 mg, deux fois par jour pendant 7 jours) comme alternative au métronidazole. Les résultats indiquent une élimination du parasite à pH 4,65, alors qu'aucune activité n'a été observée à pH 6,00 (Mahdi *et al.,* 2006).

5.4 Antimolluscicide

L'extrait aqueux brut et la fraction riche en flavonoïdes de *M. communis* exercent une activité molluscicide vis-à-vis de *Biomphalaria glabrata*, hôte intermédiaire de la schistosomiase (Deuruaz et Raynaud, 1993).

5.5 Insecticide

Des essais réalisés sur des larves de *Culex pipiens molestus* au 4^{e} stade ont mis en évidence une activité insecticide des huiles essentielles issues des feuilles et des inflorescences de *Myrtus communis*, confirmant leur toxicité envers ce moustique vecteur (Traboulsi *et al.,* 2002).

L'extrait de myrte présente également une efficacité sur plusieurs insectes des denrées stockées, notamment les adultes d'*Ephestia kuehniella*, de *Plodia interpunctella* et d'*Acanthoscelides obtectus* (Ayvaz *et al.,* 2008).

Des tests en micro-atmosphère et par badigeonnage ont montré une action sur les poux de tête (*Pediculus humanus capitis*) et leurs lentes, probablement liée à la présence majoritaire de linalol, α-pinène et linéol (Gauthier *et al.,* 1988).

Par ailleurs, une activité antipaludique a été rapportée contre *Plasmodium falciparum*, avec des concentrations efficaces comprises entre 150 et 270 µg/ml (Milhau *et al.,* 1997).

5.6 Anti-inflammatoire

Les feuilles de *Myrtus communis* contiennent plusieurs métabolites secondaires, notamment la myrtucommulone, la semimyrtucommulone et des acylphloroglucinols non prénylés. Ces composés inhibent la production des éicosanoïdes en agissant sur deux enzymes majeures, la cyclooxygénase-1 et la 5-lipoxygénase, avec des effets démontrés aussi bien in vitro qu'in vivo. Cette activité contribue à réduire les réactions inflammatoires et suggère un intérêt potentiel dans le traitement des maladies inflammatoires et allergiques (Feisst *et al.,* 2005).

Par ailleurs, des essais chez le rat, basés sur l'induction d'un œdème par la carragénine, ont confirmé cet effet. L'administration intrapéritonéale d'extraits éthanoliques (80 %), à une dose équivalente à une dose correspondant au dixième de la DL_{50}, a montré une

activité anti-inflammatoire comparable à celle de l'acide acétylsalicylique, utilisé comme référence (Al-Hindawi *et al.,* 1989).

5.7 Antioxydante

Le potentiel antioxydant des extraits de fruits de *M. communis* a été évalué par les tests DPPH et β-carotène/acide linoléique, mettant en évidence une forte activité de piégeage des radicaux libres, particulièrement pour les extraits méthanoliques (Serce *et al.,* 2010). L'activité mesurée par le test $ABTS^{+}$ confirme ces résultats, les extraits de feuilles étant les plus efficaces (Amensour *et al.,* 2010).

Les flavonoïdes et anthocyanes des baies, étudiés via le test TEAC et leur capacité de neutralisation des radicaux libres, contribuent significativement à cette activité antioxydante (Montoro *et al.,* 2006).

L'huile essentielle, comparée entre deux origines géographiques, présente une activité antioxydante plus modérée dans le test DPPH (Mimica-Dukic *et al.,* 2010).

5.8 Effet protecteur sur le cholestérol et les lipoprotéines de basse densité (LDL) humaines

Selon les travaux de Rosa et ses collaborateurs, deux composés de *Myrtus communis* L., la semimyrtucommulone et la myrtucommulone A, protègent les LDL contre l'oxydation. Ils contribuent également à préserver les acides gras polyinsaturés et le cholestérol, en limitant la formation de produits oxydés. Ces résultats suggèrent un rôle antioxydant avec un intérêt potentiel contre l'athérosclérose (Rosa et *al.,* 2008).

5.9 Antidiabétique

L'extrait de myrte induit une baisse significative de l'hyperglycémie provoquée par la streptozotocine, effet maintenu lors d'administrations répétées, sans modification de la glycémie chez les sujets sains. Ces données appuient son usage traditionnel dans la prise en charge du diabète sucré (Elfellah *et al.,* 1984).

Les feuilles de *M. communis* et son huile essentielle sont traditionnellement utilisées dans la prise en charge du diabète de type 2. Chez l'animal diabétique, cette huile présente

une activité hypoglycémiante, accompagnée d'une diminution modérée des triglycérides (Sepici *et al.,* 2004).

Le mécanisme proposé repose sur une stimulation de la glycolyse et de la glycogénogenèse, associée à une inhibition de la glycogénolyse. Une réduction de l'absorption intestinale du glucose, probablement via l'inhibition de l'α-glucosidase, est également suggérée. L'effet apparaît à partir de la quatrième heure chez les modèles diabétiques induits (alloxane) et après surcharge orale en glucose (Dineel *et al.,* 2007).

Les composés phénoliques des feuilles ont été évalués chez des rats diabétiques (streptozotocine) avec suivi de multiples paramètres biochimiques (glycémie, profil lipidique, enzymes hépatiques, fonction rénale, protéines). Une dose de 800 mg/kg montre un effet antihyperglycémiant supérieur à celle de 400 mg/kg (Fahim *et al.,* 2009).

5.10 Antimutagène

Des huiles essentielles de myrte issues de deux origines géographiques ont été étudiées pour leur activité antimutagène sur la souche mutante IC202 d'*Escherichia coli* (*oxyR*), déficiente dans la détoxification des ROS. Les résultats montrent une réduction dose-dépendante de la mutagenèse, notamment en présence de t-BOOH, indiquant un effet protecteur contre le stress oxydatif (Mimica-Dukic *et al.,* 2010).

Deux flavonoïdes isolés des feuilles de *M. communis* (myricétine-3-O-galactoside et myricétine-3-O-rhamnoside) ont été testés via le SOS chromotest et le test des comètes. Ces composés inhibent la mutagenèse induite par différents agents (nifuroxazide, aflatoxine B1, H_2O_2) et modulent l'expression de gènes impliqués dans le stress oxydatif, la réparation de l'ADN et l'apoptose (Hayder *et al.,* 2008).

5.11 Induction de l'apoptose dans les cellules cancéreuses

Les données montrent que *M. communis* induit une mort cellulaire de type apoptotique dans différentes lignées cancéreuses. Ce processus se caractérise par l'activation des caspases-3, -8 et -9, le clivage de la PARP, ainsi que par la fragmentation de l'ADN et la libération de nucléosomes dans le cytoplasme. Une dépolarisation de la membrane mitochondriale, observée notamment dans la lignée MM6, s'accompagne d'une libération du cytochrome c

vers le cytosol, confirmant l'implication de la voie mitochondriale dans cet effet (Tretiakova *et al.*, 2008).

CHAPITRE 2

Microencapsulation des composés phénoliques

1. Généralités

Les composés bioactifs sont reconnus pour leurs effets bénéfiques sur la santé. Ils sont apportés par l'alimentation, à partir de sources variées d'origine animale et végétale, telles que les huiles essentielles, les vitamines et les antioxydants (Ajeeshkumar *et al.,* 2021 ; Ali *et al.,* 2020 ; Bertolo *et al.,* 2019).

Parmi eux, l'hydroxytyrosol, le resvératrol et la curcumine présentent des propriétés antioxydantes et contribuent à la prévention et au traitement de diverses pathologies, notamment les maladies cardiovasculaires, le diabète et les affections inflammatoires (Ali *et al*., 2020 ; Bishop *et al*., 1998 ; Caseiro *et al*., 2020), ce qui suscite un intérêt croissant pour leur incorporation dans les aliments.

Cependant, leur biodisponibilité reste limitée en raison de leur sensibilité aux conditions de transformation (chaleur, lumière, oxygène), de leur volatilité, de leur faible solubilité et de caractéristiques organoleptiques parfois défavorables (Fernandes *et al*., 2019 ; Kahkeshani *et al*., 2019). Ces facteurs entraînent leur dégradation, une absorption réduite et une efficacité limitée (Galiniak *et al*., 2019 ; Guerrero *et al*., 2001 ; Islam Shishir *et al*., 2016). Dans ce contexte, la microencapsulation apparaît comme une stratégie prometteuse pour améliorer la stabilité et l'efficacité de ces composés. Par ailleurs, certains présentent un goût désagréable, notamment l'amertume associée aux polyphénols, aux flavonoïdes et aux terpènes (Kahkeshani *et al.,* 2019).

La microencapsulation est une technique largement utilisée en pharmacologie, qui consiste à enrober des composés bioactifs dans un matériau de paroi, permettant leur protection, une libération contrôlée et/ou une amélioration de leur solubilité (Karaman, 2020). Intégrés dans des matrices alimentaires, ces systèmes assurent la protection contre les facteurs environnementaux et favorisent leur stabilité et leur biodisponibilité, notamment dans les conditions digestives.

Le choix du matériau de paroi constitue un paramètre déterminant pour l'efficacité de ce procédé. Divers matériaux sont étudiés, notamment les protéines de lactosérum (Kavosi *et al*., 2018), les protéines de soja (Kharat *et al*., 2017) et des glucides tels que les maltodextrines (Coradello et Tirelli, 2021), le chitosane (Kilcher *et al*., 2008), la gomme arabique (Kogan *et al*., 2008) et l'alginate (Kris-Etherton *et al*., 2002). Toutefois, ces approches présentent des limites liées à l'utilisation de solvants organiques, à des procédés coûteux et à des durées de production élevées (Križková *et al*., 2001 ; Lieu *et al*., 2020).

Dans ce contexte, les cellules de *Saccharomyces cerevisiae* apparaissent comme une alternative prometteuse en tant que matériau de paroi (Esfanjani *et al*., 2018 ; Lila *et al*., 2016 ; Lopez *et al*., 2009). Grâce à leurs propriétés structurales, elles assurent la protection des composés bioactifs sans recours à des solvants toxiques, tout en étant peu coûteuses et largement disponibles. Cette approche permet optimiser les performances de l'encapsulation et facilite l'incorporation de ces composés dans des aliments sûrs et accessibles.

Ainsi, la microencapsulation utilisant des cellules de levure représente une stratégie innovante pour le développement d'aliments fonctionnels. Ce chapitre présente...présente les propriétés structurales de *S. cerevisiae*, les techniques d'encapsulation associées, ainsi que leurs applications potentielles et les défis à relever.

2. Caractéristiques de *Saccharomyces cerevisiae*

Saccharomyces cerevisiae, largement utilisé dans les industries alimentaires et reconnu comme sûr, constitue un matériau efficace pour la microencapsulation en raison de ses propriétés structurales spécifiques (Islam Shishir *et al*., 2016 ; Karaman, 2020 ; López *et al*., 2008 ; Mokhtari *et al*., 2017). Organisme eucaryote de forme sphérique ou ellipsoïdale, il présente des cellules de petite taille (2–5 µm) dotées d'une paroi cellulaire robuste (Lila *et al*., 2016 ; Morris *et al*., 1986).

Cette paroi est composée d'une couche externe de mannoprotéines conférant une certaine porosité, et d'une couche interne riche en β-glucanes (β-1,3 et β-1,6) et en chitine, assurant une rigidité mécanique (Lila *et al*., 2016). Cette organisation structurale favorise la protection efficace des composés bioactifs lors des procédés de microencapsulation.

Les cellules de levure possèdent une membrane plasmique composée principalement de phospholipides, de stérols et de protéines, assurant une perméabilité sélective et jouant un rôle de barrière lors de la microencapsulation (Lila *et al*., 2016 ; Nguyen *et al*., 2018). Après encapsulation, elles agissent comme une coque protectrice stable, la paroi cellulaire résistant à des températures élevées (jusqu'à 263 °C) sans altération par les composés encapsulés (Normand *et al*., 2005). Cette stabilité est confirmée par des analyses en microscopie électronique montrant la rétention de composés tels que le limonène même après des conditions d'extraction sévères (Dimopoulos *et al*., 2021).

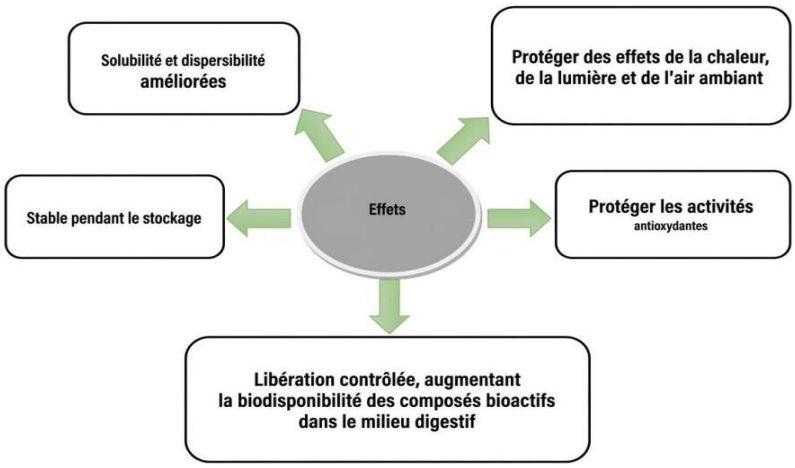


Figure 3 : Efficacité de la microencapsulation des composés bioactifs par la cellule de levure (Lieu *et al*., 2024).

Par ailleurs, les cellules de levure présentent un intérêt nutritionnel, notamment grâce aux β-glucanes (β-1,3 et β-1,6), reconnus pour leurs propriétés antioxydantes et leur potentiel thérapeutique **(Figure 4)** (Paramera *et al*., 2014 ; Paramera *et al*., 2011). Elles permettent également une libération contrôlée des composés dans des conditions gastro-intestinales, avec une digestibilité élevée (>95 %) (Lila *et al*., 2016 ; Parapouli *et al*., 2020). Ainsi, en raison de leurs propriétés structurales, de leur stabilité et de leurs bénéfices nutritionnels, les cellules de *Saccharomyces cerevisiae* constituent un matériau particulièrement prometteur pour les applications de microencapsulation en technologie alimentaire

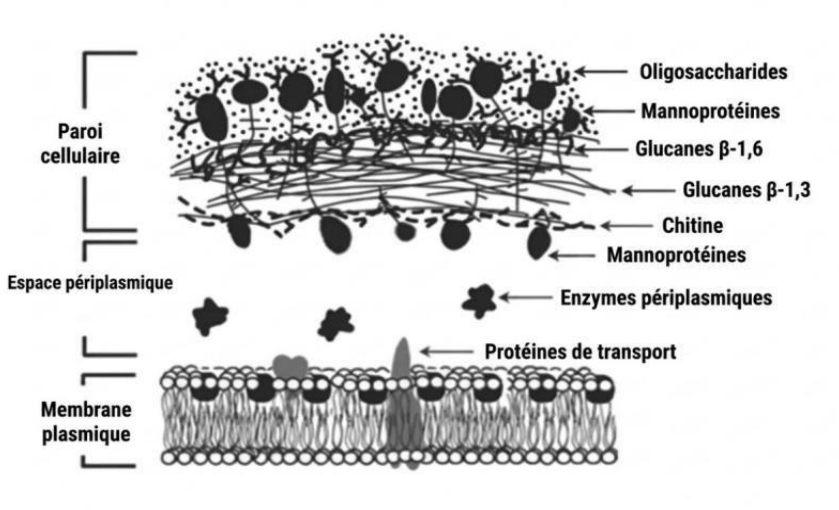


Figure 4 : Enveloppe cellulaire de *Saccharomyces cerevisiae* (Paramera *et al*., 2014)

3. La cellule de levure comme microcapsule potentielle

3.1 Microencapsulation des composés bioactifs dans la cellule de levure

Les cellules de levure, reconnues GRAS et biodégradables, peuvent être utilisées sous différentes formes (vivantes ou mortes, humides ou sèches) pour l'encapsulation (Karaman, 2020 ; Paris *et al*., 2020). La diversité et la simplicité des méthodes de traitement permettent une adaptation aisée des techniques de microencapsulation selon les objectifs visés **(Figure 5).**

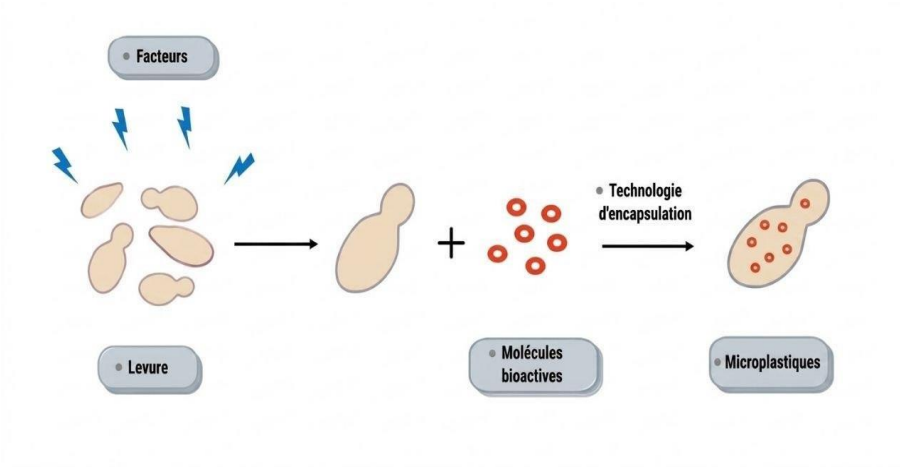


Figure 5 : Étapes de la microencapsulation des composés bioactifs dans les cellules de levure (Lieu *et al*., 2024).

Grâce à leur structure, elles permettent l'encapsulation de composés hydrophiles et hydrophobes dans des milieux aqueux ou organiques. Leur efficacité a été démontrée pour divers composés bioactifs, tels que la curcumine (Patras *et al*., 2010), l'acide chlorogénique (Islam Shishir *et al*., 2016), la thymoquinone (Fu et al., 2021), le limonène (Normand *et al*., 2005) et les anthocyanines (McClements *et al*., 2007), avec une protection accrue contre des conditions défavorables (lumière, température, digestion).

Plusieurs approches de microencapsulation, allant de méthodes simples à des techniques combinées, ont été développées et optimisées, reflétant le potentiel croissant des cellules de levure dans ce domaine **(Tableau 2).**

Tableau 2 : Rôle des techniques d'encapsulation par les cellules de levure sur les composés bioactifs naturels

Technique d'encapsulation	Matériau de paroi	Matériau actif	Efficacité d'encapsulation (%)	Biodisponibilité (%) (Estomac)	Biodisponibilité (%) (Intestin grêle)	Références
Plasmolyse	Cellules de levure	Huile de graines de nigelle	59,97 ± 3,70 %	N/A	N/A	**(Fu *et al.*, 2021)**
	Saccharomyces cerevisiae	Antioxydant hydrosoluble Anthocyanines Anthocyanines	5,2 % – 12,6 % 36,45 ± 0,35 % 27 %	N/A N/A N/A	N/A N/A N/A	**(Islam Shishir *et al.*, 2016)** **(Lopez *et al.*, 2009)** **(Liu *et al.*, 2016)**
Autolyse	Saccharomyces cerevisiae	Huile de poisson Huile essentielle d'origan	82,7 ± 1,0 % 50,1 – 57,7 %	N/A N/A	N/A N/A	**(Pham-Hoang *et al.*, 2018)** **(Mokhtari *et al.*, 2017)**
Émulsion	Cellules de levure	Limonène Huile de krill antarctique	70,6 – 85,9 % N/A	N/A 23,80 ± 2,34 %	N/A N/A	**(Dimopoulos *et al.*, 2021)** **(Puértolas *et al.*, 2013)**
	Saccharomyces cerevisiae	Huile de graines de pourpier	53 – 65 %	N/A	71,08 ± 1,77 %	**(Puértolas *et al.*, 2012)**
Ultrasons	Saccharomyces cerevisiae	Anthocyanines Curcumine Fisétine	40,22 ± 0,67 % 58,5 % 76,6 %	N/A N/A N/A	N/A N/A N/A	**(Lopez *et al.*, 2009)** **(Pulido-Moran *et al.*, 2016)**
Infusion	Saccharomyces	Curcumine	> 91,4	N/A	N/A	**(Rauf *et al.*,**

sous vide	cerevisiae		%			**2018)**
Champ électrique pulsé (PEF)	Saccharomyces cerevisiae	Huile essentielle d'origan	49,9 – 61,8 %	N/A	N/A	**(Mokhtari *et al*., 2017)**

3.1.1 Méthode de plasmolyse

La plasmolyse est une technique utilisée pour augmenter la capacité de charge des cellules de levure, basée sur l'effet de la pression osmotique **(Figure 6)**. L'exposition à un milieu hypertonique entraîne une contraction cellulaire et des modifications de la paroi et de la membrane plasmique, cette dernière étant particulièrement affectée en raison de la libération de composants membranaires (Ruiz-Rodriguez *et al*., 2008).

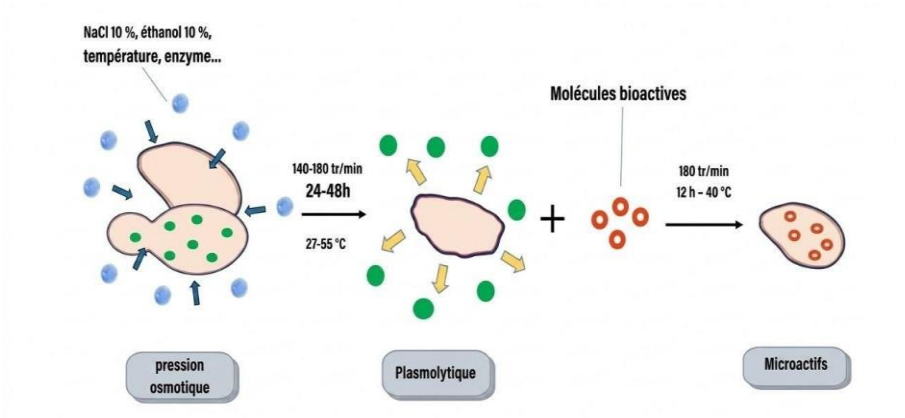


Figure 6 : Illustration du processus de plasmolyse (Lieu *et al*., 2024).

La plasmolyse, bien que relativement longue, nécessite l'usage de produits chimiques (souvent NaCl) (Fu *et al*., 2021 ; Islam Shishir *et al*., 2016 ; Lopez *et al*., 2009 ; McClements *et al*., 2007), ainsi que des traitements thermiques (Liu *et al*., 2016 ; Paris *et al*., 2020) et enzymatiques (Pham-Hoang *et al*., 2018) qui facilitent la diffusion des composés bioactifs et augmentent la capacité de charge des cellules. Après restitution dans un milieu isotone, la contraction de la surface cellulaire est partiellement réversible, mais la structure interne demeure modifiée (Ruiz-Rodriguez *et al*., 2008).

Des études ont montré que la plasmolyse modifie la membrane cytoplasmique (augmentation de la fluidité lipidique), dégrade partiellement les mannoprotéines et amincit les glucanes β-1,3 et β-1,6, rendant les parois cellulaires plus fines (Karaman, 2020). Les cellules plasmolysées présentent une surface déformée et rétractée, facilitant l'encapsulation des composés bioactifs (Fu *et al*., 2021).

Cette technique améliore la capacité d'absorption des huiles (jusqu'à 29,98 % contre 19,59 % pour les cellules non plasmolysées) (Fu *et al.*, 2021) et double l'efficacité de micro-encapsulation de certains composés comme l'acide chlorogénique (Islam Shishir *et al*., 2016) ou les anthocyanines (McClements *et al*., 2007). La teneur en eau des cellules influence également l'efficacité : les cellules humides, plus perméables, sont plus adaptées pour les composés hydrophiles (Liu *et al*., 2016).

La micro-encapsulation par diffusion passive ne dépend pas de la viabilité des cellules (Paris *et al*., 2020), mais son efficacité reste limitée. Elle est donc souvent combinée avec d'autres techniques, telles que l'émulsion (Fu *et al*., 2021 ; Puértolas *et al*., 2013), l'utilisation d'éthanol et d'ultrasons (Lopez *et al*., 2009), le séchage par pulvérisation (Salehi *et al*., 2020) ou la lyophilisation (Islam Shishir *et al*., 2016).

3.1.2 Méthode d'autolyse

Comme la plasmolyse, l'autolyse est un prétraitement des cellules avant micro-encapsulation **(Figure 7)**. Elle résulte de l'activité des enzymes hydrolytiques (protéases et nucléases), libérant peptides, acides aminés et nucléotides (Mokhtari *et al*., 2017 ; Pham-Hoang *et al*., 2018). La température optimale pour l'autolyse de la levure est d'environ 55 °C, et l'ajout d'acétate d'éthyle à 1,5 % (p/p) améliore l'encapsulation de l'huile de poisson (Pham-Hoang *et al*., 2018). L'analyse SEM a montré qu'après 24 h, la paroi cellulaire perd sa rigidité à cause de la dégradation des mannoprotéines, facilitant l'encapsulation des composés bioactifs (Mokhtari *et al*., 2017). Cette méthode nécessite toutefois des durées longues et des températures élevées (52–85 °C), rendant le contrôle des paramètres crucial pour les composés sensibles.

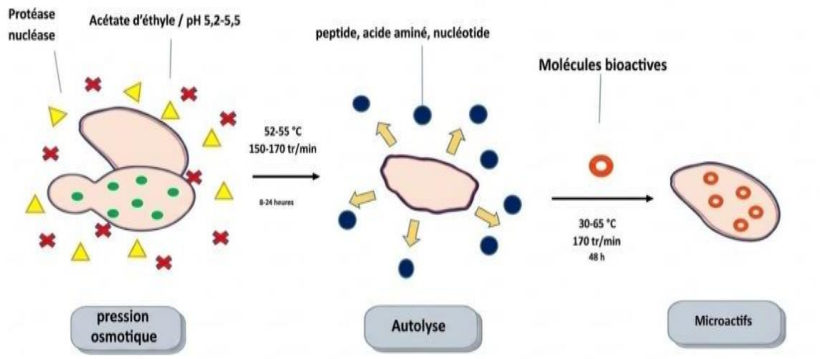


Figure 7 : Illustration du processus d'autolyse (Lieu *et al*., 2024).

3.1.3 Méthode d'émulsion

La méthode d'émulsion appliquée à la microencapsulation par levures repose sur la mise en contact de cellules de levure avec des composés bioactifs dans des conditions contrôlées (agitation, température, durée). L'eau contenue dans l'émulsion favorise l'ouverture des parois cellulaires et augmente la perméabilité membranaire, facilitant la diffusion interne des composés. Le procédé comprend trois étapes : préparation d'une émulsion eau-limonène, pulvérisation sur les cellules de levure, puis séchage. La rétention de l'émulsion est assurée par trois mécanismes : adsorption superficielle, forces capillaires et formation d'agrégats (Errenst *et al*., 2021).

L'utilisation d'huile de krill antarctique, en raison de sa solubilité lipidique, accélère la diffusion transmembranaire et réduit le temps nécessaire (Fu *et al*., 2021).

Après encapsulation, un séchage (par pulvérisation, lyophilisation ou via un concentré CPF) stabilise les molécules et facilite leur stockage (Paramera *et al*., 2011 ; Czerniak *et al*., 2015). Cette approche se distingue par sa simplicité et son efficacité, mais nécessite une attention particulière au caractère hydrophile ou hydrophobe du composé bioactif ainsi qu'à l'incorporation éventuelle d'huile dans des produits alimentaires sans matières grasses **(Figure 8).**

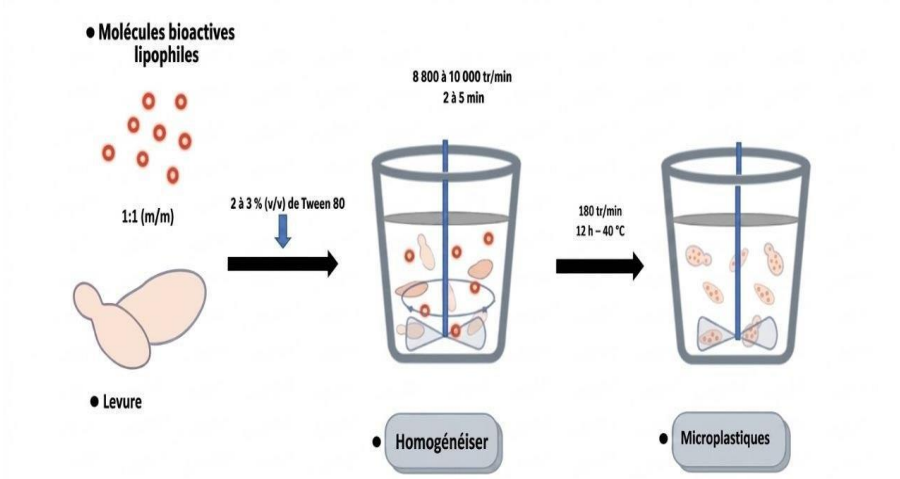


Figure 8 : Illustration du procédé à base d'émulsion (Lieu *et al*., 2024).

3.1.4 Infusion sous vide

L'infusion sous vide repose sur l'évaporation rapide du solvant, qui concentre les substances biologiques tout en facilitant leur transport à travers la paroi et la membrane cellulaires **(figure 9)** (Young *et al*., 2017).

Appliquée avec succès à la microencapsulation de l'huile essentielle de Mānuka dans des cellules de levure, cette méthode améliore la stabilité et les propriétés volatiles des

composés pour une utilisation à grande échelle dans l'industrie alimentaire (Liu *et al*., 2021).

L'efficacité d'encapsulation de la fisétine et de la curcumine dépend de la concentration en éthanol, l'optimum étant de 35 %. Les rendements obtenus par infusion sous vide atteignent 66,6 % pour la fisétine et 64 % pour la curcumine, contre seulement 10,3 % et 18,6 % par diffusion passive. De plus, le temps nécessaire est inférieur à 5 minutes, soit une vitesse 288 fois supérieure à celle de la diffusion passive (Young *et al*., 2017).

L'infusion sous vide offre ainsi une efficacité nettement supérieure à la diffusion passive, réduisant les coûts, la consommation énergétique et la durée du procédé. Cependant, cette technique peut induire des altérations structurales des cellules de levure, susceptibles d'affecter l'efficacité globale de la microencapsulation.

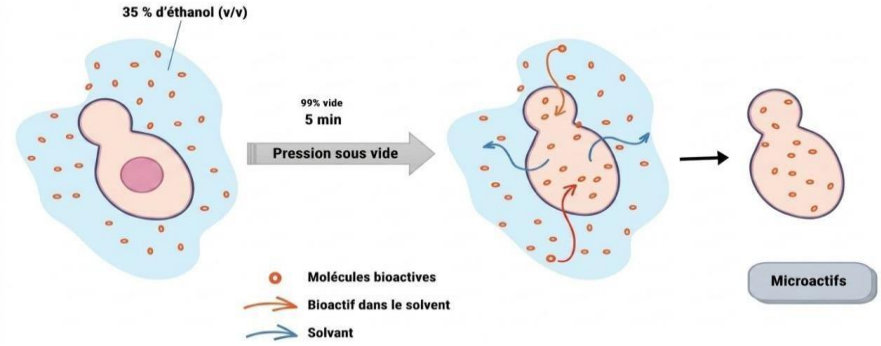


Figure 9 : Illustration du procédé d'infusion sous vide (Lieu *et al*., 2024).

3.1.5 Traitement ultrasonique

Dans le domaine industriel, les ultrasons sont couramment utilisés pour la lyse cellulaire et l'inactivation des micro-organismes. Ils altèrent la paroi et la membrane des cellules en les amincissant, en générant des micro-perforations et en modifiant leur perméabilité (Guerrero *et al*., 2001 ; Wu *etal*., 2015).

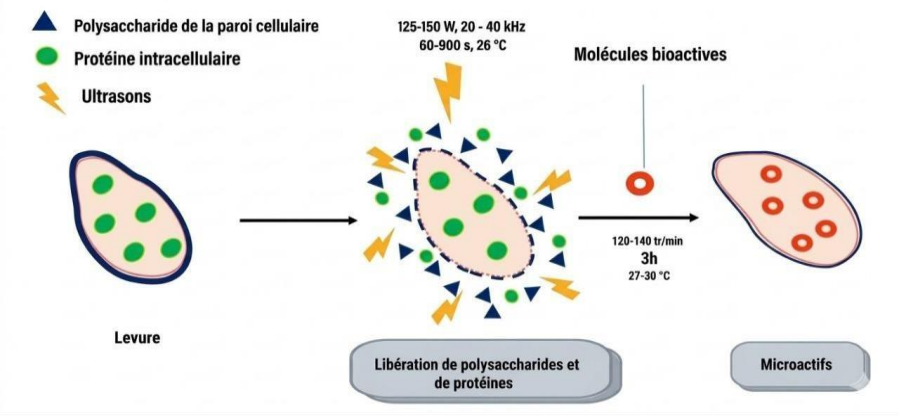


Figure 10 : Illustration du procédé par ultrasons (Lieu *et al*., 2024).

Ce phénomène favorise l'incorporation des composés bioactifs dans les cellules de levure, améliorant l'efficacité de microencapsulation des anthocyanines (Lieu *et al*., 2020) et augmentant la teneur en β-carotène encapsulé (Pham-Hoang *et al*., 2018).

Par ailleurs, les cellules de levure prétraitées par ultrasons présentent une capacité de rétention d'huile supérieure à celle des cellules non traitées ou exposées à la température, au NaCl ou à l'éthanol (Bertolo *et al*., 2019).

Cependant, ce traitement génère une production de chaleur susceptible de compromettre l'efficacité de l'encapsulation ultérieure. Il entraîne également une dégradation plus marquée de la couleur des anthocyanines par rapport aux traitements par éthanol ou plasmolyse (Lieu *et al*., 2020), et rend les cellules plus sensibles aux effets thermiques (Ciccolini *et al*., 1997).

Enfin, l'intensité de la puissance ultrasonique appliquée influence le rendement de la microencapsulation. Par conséquent, une optimisation conjointe de la puissance ultrasonique et du choix des composés bioactifs s'avère essentielle.

3.1.6 Méthode des champs électriques pulsés (PEF)

Dans le secteur agroalimentaire, la technologie des champs électriques pulsés (PEF) est utilisée pour la conservation des aliments (Toepf *et al*., 2007) , l'extraction de composés végétaux (Lopez *et al*., 2009 ; Puértolas *et al*., 2013) et la vinification (López *et al*., 2008) . Cette technique repose sur l'application d'impulsions très brèves de courant continu (de la microseconde à la milliseconde) à un matériau placé entre deux électrodes, l'intensité du champ dépendant de la distance inter-électrodes et de la tension appliquée (Puértolas *et al*., 2012).

Chez les cellules de levure, le traitement par PEF induit une augmentation de la porosité pariétale, des modifications structurales des mannoprotéines et la formation de pores membranaires, facilitant la diffusion des solutés et améliorant la perméabilité cellulaire (Ganeva *et al*., 2014).

L'osmose des cellules eucaryotes peut être influencée par des champs électriques faibles à modérés appliqués pendant 100 à 10 000 μs, ou par des champs plus intenses (1 à 10 $kV \cdot cm^{-1}$) sur des durées plus courtes (< 100 μs) (Puértolas *et al*., 2012) .

Les observations en microscopie électronique à balayage (SEM) indiquent que la microencapsulation d'origan dans des cellules de levure traitées par PEF à 107 kJ/kg provoque l'apparition de pores, mais la paroi cellulaire demeure intacte, conserve sa morphologie et présente une perméabilité accrue par rapport aux cellules non traitées (Dimopoulos *et al*.,

2021). Le PEF modifie donc la structure cellulaire sans engendrer de dommages majeurs, ce qui favorise l'encapsulation et la capacité de rétention d'huile.

Cette technique permet d'accélérer significativement la cinétique d'encapsulation et de produire des matériaux encapsulés avec des temps d'incubation plus courts ou à des températures plus basses (Dimopoulos *et al*., 2021) . Néanmoins, son application à grande échelle nécessite des équipements complexes, et les paramètres des champs électriques doivent être ajustés avec soin en fonction de chaque composé bioactif.

4. Efficacité de la micro encapsulation

La stabilité des composés bioactifs est essentielle pour préserver leurs effets bénéfiques sur la santé. L'évaluation post-encapsulation doit porter sur les conditions de stockage, l'oxydation, la résistance à la chaleur et la capacité de libération dans l'environnement gastro-intestinal. L'efficacité de la microencapsulation se mesure notamment par l'aptitude des composés à résister aux traitements thermiques, à conserver leur activité durant le stockage et à assurer une libération appropriée dans l'intestin. (Rezagholizade-shirvan *et al*., 2024 ; Shishie *et al*., 2018)

4.1 Stabilité thermique

La résistance thermique des composés bioactifs constitue un paramètre déterminant pour leur traitement industriel et leur conservation. Bien que ces molécules présentent une sensibilité élevée à la chaleur, la microencapsulation dans des cellules de levure réduit significativement leur altération, leur instabilité et leur inactivation. Les cellules de levure offrent une protection supérieure et limitent la dégradation thermique de la curcumine par rapport à la β-cyclodextrine et à l'amidon modifié, pour des températures comprises entre 100 et 200 °C (Paramera *et al*., 2011).

La paroi des cellules de levure reste stable jusqu'à 263 °C, protégeant efficacement le limonène microencapsulé (Normand *et al.*, 2005).

Un traitement de plasmolyse des cellules de levure protège la curcumine contre la dégradation à 70 °C pendant 30 minutes ou à 90 °C pendant 1 minute, offrant une meilleure protection que les cellules non plasmolysées. Les cellules plasmolysées contiennent principalement de l'ADN et des substances formant un biofilm dénaturé, favorisant la fixation de la curcumine exposée à la chaleur (Young et Nitin, 2019).

Par ailleurs, l'association d'un traitement à l'éthanol et aux ultrasons a permis de réduire la perte thermique des anthocyanines microencapsulées dans les cellules de levure (Lieu *et al*., 2020) . L'ensemble de ces observations indique que les cellules de levure renforcent efficacement la résistance thermique des composés bioactifs microencapsulés.

4.2 Stabilité des composés bioactifs lors du stockage

La stabilité des composés bioactifs pendant le stockage est essentielle à leur efficacité. Les cellules de levure agissent comme une barrière protectrice contre l'humidité, la lumière et l'oxydation. L'acide chlorogénique microencapsulé reste stable avec une teneur supérieure à 98 %. La curcumine encapsulée voit sa durabilité multipliée par 5,5 à 32,8 % d'humidité relative, et elle est deux fois plus stable que la forme libre entre 65,4 et 90 % d'humidité (Shi *et al*., 2007), tandis que sa stabilité optique est multipliée par 2,6 (Paramera *et al*., 2011).

La thymoquinone, instable à la chaleur, à l'humidité et à la lumière, présente après 8 jours à 65 °C une dégradation de 52,63 % contre 96,78 % sans encapsulation (Karaman, 2020) L'huile de poisson voit sa stabilité améliorée sur 30 jours de stockage après séchage par pulvérisation lorsque l'autolyse est appliquée (Czerniak *et al*., 2015). La protection des arômes contre l'oxydation pendant deux mois est attribuée aux mannoprotéines et β-glucanes de la paroi de levure (Sultana *et al*., 2018) .

Toutefois, à 37 °C, les anthocyanines peuvent être dégradées par les enzymes de levure, avec une perte de couleur de 36,5 % dans les cellules intactes, réduite à 2,5 % après inactivation thermique des enzymes (Nguyen *et al*., 2018).

4.3 Activité antioxydante

L'activité antioxydante constitue un critère clé pour évaluer la valeur des composés bioactifs. Celle-ci n'a non seulement été conservée, mais également améliorée après microencapsulation du resvératrol dans des cellules de levure plasmolysées : l'activité de piégeage des radicaux DPPH a progressivement augmenté de 27,37 % à 63,35 ± 0,31 % lorsque sa concentration est passée de 10,18 µg à 31,21 µg/ml (Shi *et al*., 2008).

En revanche, l'activité antioxydante des cellules plasmolysées s'est avérée inférieure à celle des cellules non plasmolysées, en raison de la perte des composants antioxydants durant la plasmolyse après huit jours de stockage (Karaman, 2020). Ces observations indiquent que l'efficacité de la protection antioxydante dépend à la fois du type de composés bioactifs microencapsulés et de la méthode de microencapsulation employée.

4.4 Solubilité

La faible solubilité de certains composés bioactifs (huiles essentielles, vitamines liposolubles, acides gras) constitue un inconvénient majeur pour leur utilisation en technologie alimentaire. L'un des objectifs principaux de la microencapsulation est donc d'améliorer leur solubilité. Lorsqu'elles sont placées dans une solution, les microcapsules se désintègrent puis se dissolvent, cette dernière étape étant relativement lente et influencée par la solubilité du cœur, la taille des particules et les propriétés hydrophobes ou hydrophiles (Dadkhodazade *et al*., 2021) .

Des études antérieures ont démontré que la microencapsulation dans des cellules de levure améliore la solubilité des composés bioactifs. Le resvératrol microencapsulé à 25 °C présente une solubilité dans l'eau deux fois supérieure à celle du resvératrol liquide et trois fois supérieure à celle du resvératrol cristallin, pour un même volume d'eau (Shi *et al*., 2008).

. La solubilité de la curcumine a été renforcée par sa microencapsulation dans la levure (Paramera *et al*., 2011) . Ces résultats indiquent que la microencapsulation de composés peu solubles dans les cellules de levure limite les restrictions liées à l'hydrophobie et augmente l'applicabilité des produits microencapsulés.

4.5 Libération des composés bioactifs dans les sites cibles et l'environnement digestif

Les effets bénéfiques des composés bioactifs pour la santé ne se manifestent que lorsqu'ils sont libérés au niveau de leurs sites cibles, généralement dans le tractus gastro-intestinal. Les microcapsules formées par des cellules de levure permettent de contrôler cette libération, assurant une diffusion progressive vers le site cible (Dadkhodazade et al., 2021).

Plus de 95 % de l'acide chlorogénique sont libérés en deux heures, et la totalité en cinq heures, dans un fluide digestif simulé, indiquant que les cellules de levure n'entravent pas la libération du composé (Shi *et al*., 2007).

Environ 90 % du resvératrol sont libérés en 90 minutes dans un fluide gastrique simulé après microencapsulation, améliorant ainsi sa faible biodisponibilité (Shi *et al*., 2008) .

De manière similaire, les cellules de levure favorisent une libération progressive du cholécalciférol dans l'estomac et une libération presque complète dans l'intestin (97,9 %), augmentant sa biodisponibilité dans l'intestin grêle et permettant aux lipides lipophiles d'atteindre la circulation sanguine (Dadkhodazade *et al*., 2018) . Ces observations démontrent que les microcapsules assurent une libération graduelle et contrôlée des composés, avec une solubilité élevée dans les fluides gastriques et intestinaux simulés,

facilitant l'absorption des composés bioactifs, ralentissant leur élimination et maximisant leurs effets bénéfiques sur l'organisme.

CHAPITRE 3

Cookies sans gluten

CHAPITRE 3 : Cookies sans gluten

1. Généralité

La demande croissante pour les produits sans gluten contribue à une reconfiguration majeure du marché alimentaire mondial, dont le chiffre d'affaires, supérieur à 21,61 milliards de dollars en 2019, pourrait atteindre 24 milliards de dollars d'ici 2027 (Grand View Research, 2022). Cette dynamique résulte de facteurs variés : progrès diagnostiques des pathologies liées au gluten (maladie cœliaque, hypersensibilité non cœliaque, allergie au blé) (Brouns *et al*., 2019), choix de mode de vie motivés par des considérations culturelles, sanitaires ou écologiques (Worosz et Wilson, 2012), et prévalence mondiale de la maladie cœliaque estimée à 1 % (Singh *et al*., 2018). L'éviction stricte et définitive du blé, du triticale, du seigle et de l'orge (Di Sabatino et Corazza, 2009) modifie profondément les habitudes de vie, la majorité des produits commercialisés présentant un risque de contamination croisée. Dans ce contexte, la boulangerie sans gluten occupe une position prédominante (Markets et Markets, 2021), les cookies y tenant une place centrale : leur consommation dépasse celle du pain chez les patients cœliaques (Jnawali *et al*., 2016 ; Valitutti *et al.,* 2017), et ils offrent une longue durée de conservation ainsi qu'une grande polyvalence (Silva *et al.,* 2021). Néanmoins, l'élimination du gluten, dont le réseau protéique confère des propriétés rhéologiques essentielles ; notamment la rétention des gaz et la formation de la structure alvéolaire , constitue un défi technologique majeur (Clerici et El-Dash, 2006 ; Clerici *et al.,* 2009 ; Silva *et al.,* 2021). Bien que les cookies de type sablé soient généralement plus aisés à formuler sans gluten que les biscuits feuilletés (Davidson, 2018), leur qualité nutritionnelle peut s'en trouver altérée, en raison notamment d'une diminution de la teneur en protéines et d'un enrichissement relatif en glucides et en lipides. En dépit des avancées enregistrées, des insuffisances subsistent, en partie attribuables au caractère historiquement artisanal de ces produits ainsi qu'à la variabilité des formulations selon les contextes régionaux.

2. Matières premières utilisées dans les cookies sans gluten

2.1 Amidons

Les amidons sont largement employés dans le secteur agroalimentaire comme ingrédients fonctionnels améliorant les propriétés texturales, épaississants et stabilisants (Schmiele *et al*., 2019 ; Horstmann *et al.,* 2017). Le riz constitue la source amylacée prédominante (62,3 % des études recensées) en raison de sa couleur claire, sa saveur neutre et son absence d'interférence dans les formulations boulangères (Rosell et Marco, 2008). Le maïs, présent dans 35,5 % des formulations, confère couleur et brillance aux produits (Serna-Saldivar et

Carrillo, 2018). L'amidon figure systématiquement dans l'ensemble des travaux analysés, témoignant de son rôle fondamental sur les propriétés technologiques et sensorielles. Selon son origine, son indice glycémique (IG) et sa proportion, il influence la disponibilité des glucides à IG élevé et la qualité nutritionnelle globale (Arnone *et al*., 2022). Des sources amylacées alternatives, plus riches en protéines que les céréales (farine de châtaigne, farine de lentille, *Agaricus bisporus*), apparaissent ponctuellement (une étude chacune). D'autres ingrédients (amarante, haricot, pois chiche, quinoa, *Trapa natans*, avoine) figurent dans environ 6,5 % des études chacun, tandis que le sarrasin atteint 25,8 % (Carrillo, 2018). L'association équilibrée de ces ingrédients alternatifs avec des matières premières fonctionnelles pourrait améliorer la valeur nutritionnelle des formulations.

2.2 Légumineuses

Les légumineuses présentent un profil en acides aminés complémentaire de celui des céréales, du fait de leur richesse en tryptophane et lysine associée à une carence relative en méthionine (Baptist, 1954 ; Kan *et al*., 2017). Cette complémentarité permet d'obtenir une source protéique équilibrée, susceptible d'améliorer la qualité nutritionnelle des produits sans gluten. L'intégration des légumineuses dans les formulations est notamment documentée au Brésil, où des cookies sans gluten à base de farines de riz et de haricot ont été élaborés (Silva *et al.*, 2021). Les sources protéiques végétales ne sont pas systématiquement incorporées dans les cookies, bien qu'elles figurent dans 65 % des études recensées (21 formulations). Leur répartition est la suivante : farine de sarrasin (16,1 %), farine d'amarante (6,5 %), pois chiche (6,5 %), haricot (6,5 %), isolat de protéine de pois (9,7 %). La lentille, le lupin, la graine de luzerne, *Trapa natans*, le chanvre et l'isolat de protéine de colza ne sont mentionnés chacun que dans une seule étude (Baptist, 1954 ; Kan *et al*., 2017 ; Silva *et al.*, 2021).

2.3 Fibres

Les fibres sont introduites dans les études sous forme d'ingrédients purs (fibres de pois jaune, fibres végétales non spécifiées, fibres de framboise et myrtille) ou sous forme de farines et de sons (avoine, lentille verte et rouge, sarrasin complet, *Trapa natans*, châtaigne, konjac, sarrasin tartare, graines de luzerne, polysaccharides d'*Agaricus bisporus* fermentés ou non, farine et mucilage d'*Opuntia monacantha*, semoule de maïs complète et extrudée) (Gani *et al*., 2010),

Chacune de ces sources n'étant mentionnée qu'une seule fois. D'autres ingrédients fibreux apparaissent plus fréquemment : quinoa, amarante, pois chiche et chanvre (6,5 %

chacun), riz brun (9,7 %), maïs (22,6 %) et sarrasin (25,8 %). Les fibres ont également été incorporées sous d'autres formes (inuline, graines de chia hydratées, flocons d'oignon déshydratés, poudre de résidus de pomme, graines de lin trempées, sésame, farine de chanvre), chacune citée une seule fois, à l'exception des graines de lin (6,5 %) **.** Si la présence de fibres est rapportée dans une proportion notable des travaux, l'objectif d'enrichissement ne peut être systématiquement inféré des seules formulations. Par ailleurs, l'attention portée à l'équilibre entre fractions soluble, insoluble et prébiotique demeure limitée, ce qui ouvre des perspectives d'amélioration (Davidson, 2018).

2.4 Hydrocolloïdes

Les gommes, classées parmi les fibres solubles, jouent un rôle déterminant dans la modulation de la viscosité et des propriétés texturales des matrices alimentaires (Xu et al., 2020), tout en exerçant des effets physiologiques bénéfiques (Spiller *et al.*, 1975). Leur incorporation dans les cookies répond à une double finalité : l'amélioration des performances technologiques et l'enrichissement nutritionnel via l'apport en fibres solubles. À cet égard, l'utilisation d'hydrocolloïdes a été largement documentée. Cependant, dans la majorité des travaux, leur incorporation répond essentiellement à un objectif technologique, sans visée explicite d'enrichissement en fibres. Cette orientation s'explique vraisemblablement par les faibles teneurs utilisées (généralement inférieures à 2 %), qui demeurent insuffisantes pour induire un apport nutritionnel significatif en fibres (Silva et al., 2021 ; Sulieman et al., 2018 ; Torbica et al., 2012).

2.5 Sucres

Le sucre ne se limite pas à l'apport de saveur sucrée : il améliore également les propriétés texturales et le profil aromatique des produits (Davidson, 2018). Il est incorporé dans la quasi-totalité des travaux recensés (28 études). Cependant, sa consommation excessive est corrélée à l'émergence de troubles métaboliques (surpoids, obésité, pathologies chroniques), ce qui constitue un frein à l'optimisation nutritionnelle des cookies sans gluten (Arnone *et al*., 2022).). Pour appréhender la perception sensorielle du goût sucré, le sucralose, un édulcorant à haute intensité sans apport calorique, a été utilisé, à une concentration de 680 mg pour 100 g de farine, conforme aux seuils d'apport journalier admissible établis par la FDA (2022a) (5 mg/kg/j) (Naseer *et al*., 2021).

2.6 Lipides

Les lipides contribuent à la saveur, à la texture, à la tendreté et au croquant des produits de boulangerie (Marcelino et Marcelino, 2012). Dans les cookies sans gluten, leur influence technologique est déterminante. Les sources lipidiques employées dans les études recensées se répartissent en huiles (32 %), graisses végétales (26 %), beurre (19,3 %), margarine (16 %) et graisses végétales hydrogénées (6,5 %). Les teneurs en matières grasses varient de 9,7 à 40 %, ce qui peut altérer l'équilibre nutritionnel des produits. Par ailleurs, l'enrobage des particules de farine par les lipides interfère avec l'hydratation des protéines et, le cas échéant, avec la formation du réseau gluténique (Davidson, 2018). La littérature témoigne d'un intérêt croissant pour les stratégies de substitution ou de réduction lipidique (ITAL, 2020).

3. Les propriétés technologiques

Les caractérisations technologiques des cookies sans gluten portent sur la dureté, la résistance à la rupture, l'expansion et le facteur d'étalement. L'expansion dépend des agents structurants (isolats protéiques, hydrocolloïdes dont gomme xanthane et HPMC) et de l'amidon (Brito *et al*., 2015 ; De la Barca *et al*., 2010). Le taux d'étalement (largeur/épaisseur), indicateur de rendement après cuisson (Bolarinwa *et al*., 2019 ; Jan *et al*., 2018), varie de 4,60 à 15,59 selon les formulations (Akesowan, 2016). Les gommes diminuent ce taux par élévation de viscosité (Naseer *et al*., 2021), tandis que les proportions farine/amidon/protéines et les conditions de cuisson modulent les dimensions (Mancebo *et al*., 2016 ; Jan *et al*., 2018). La dureté des cookies sans gluten s'étend de 1,89 N à 75,7 N (Akesowan, 2016 ; Brito *et al*., 2015). Les fibres (Naseer *et al*., 2021) et le sucre (état vitreux au refroidissement) l'augmentent (Jan *et al*., 2018). La distance de rupture des cookies varie de 0,34 mm à 2,73 mm (Altindag *et al.,* 2014 ; Mancebo *et al.,* 2016). L'incorporation de protéines diminue la résistance à la fissuration (Han *et al*., 2010 ; Mancebo *et al*., 2016). Les cookies présentent une luminosité élevée (L), une teinte jaune prononcée (b) et une faible composante rouge (a), variations conditionnées par la nature des ingrédients (Torbica *et al*., 2012). Les farines claires favorisent une L élevée, tandis que les farines de fruits à coque augmentent a* et b* (Paciulli *et al*., 2018).

4. Propriétés sensorielles

La réglementation FDA (2022b) fixe à 20 ppm la teneur maximale en gluten dans les produits étiquetés « sans gluten », mais aucune étude recensée n'a mobilisé la méthode

ELISA, technique de référence homologuée par le Codex Alimentarius (2006). Enfin, les travaux ont mobilisé des panélistes entraînés ou semi-entraînés.

Les protocoles d'analyse sensorielle reposent sur l'analyse descriptive quantitative (Duta et Culetu, 2015 ; Radočaj *et al.*, 2014 ; Sedej *et al.*, 2011) ainsi que sur des tests affectifs d'acceptation portant sur le goût, l'arôme, la texture, l'apparence, le croustillant et la couleur.

Les résultats font état d'une bonne acceptabilité globale des cookies sans gluten. Les sessions de formation des panélistes ont porté sur des propriétés technologiques (croustillant, masticabilité, dureté, éclatement et sensation en bouche). Cependant, les publications ne précisent ni le déroulement de ces sessions, ni les critères de sélection des participants, ni la nature (avec ou sans gluten) des produits d'entraînement (Ola et Seo, 2025 ; Olawoye et Gbadamosi, 2020). L'utilisation éventuelle de cookies glutenifères pour la formation pourrait avoir généré des références mémorielles sensorielles appliquées aux cookies sans gluten, traduisant une recherche de standardisation avec les produits conventionnels. Ces éléments interrogent les postures de l'industrie et de la communauté scientifique. Les consommateurs astreints au régime sans gluten demeurent confrontés à des contraintes nutritionnelles, sensorielles, technologiques et économiques, ainsi qu'à une offre limitée et d'un coût élevé (Ola et Seo, 2025).

5. Propriétés nutritionnelles

Les cookies sans gluten présentent une composition riche en matières grasses et en sucres, associée à l'emploi de farines raffinées et d'amidons pauvres en fibres, ce qui leur confère un caractère hypercalorique et interroge leur valeur nutritionnelle. Un seul échantillon atteint le seuil de « teneur élevée en fibres » (≥ 5 g/30 g), tandis que 19,3 % des produits étudiés peuvent être considérés comme « sources de fibres » (≥ 2,5 g/30 g) (Radočaj et al., 2014 ; Silva *et al.*, 2021 ; Torbica *et al.*, 2012). Par ailleurs, les amidons se répartissent en trois catégories fonctionnelles selon leur cinétique de digestion : l'amidon rapidement digestible (RDS), l'amidon lentement digestible (SDS) (tous deux hydrolysés dans l'intestin grêle mais à des vitesses différentes) et l'amidon résistant (RS), qui échappe à l'action enzymatique (Rashmi et Urooj, 2003 ; Fuentes-Zaragoza *et al.*, 2011). Des protocoles de digestion in vitro permettent d'évaluer la réponse glycémique potentielle des aliments (Singh *et al.*, 2010).

Des variations dans les cinétiques d'hydrolyse de l'amidon ont été observées parmi les cookies évalués (Giuberti *et al*., 2018 ; Molinari *et al*., 2018 ; Naseer *et al*., 2021). La farine de riz a été substituée partiellement par de la farine de graines de luzerne, induisant une réduction de l'amidon rapidement digestible (RDS) et une augmentation de l'amidon résistant (RS) (Giuberti *et al*., 2018). Les amidons de légumineuses présentent des teneurs plus faibles en RDS et plus élevées en amidon lentement digestible (SDS) et en RS que les amidons céréaliers (Sandhu et Lim, 2008). Le RS est reconnu pour ses effets bénéfiques sur la santé (régulation du cholestérol, réduction de l'indice glycémique, prévention du cancer colorectal) (Polakof *et al*., 2013). Les cookies formulés à base de sarrasin tartare et de malt d'orge ont présenté une cinétique d'hydrolyse plus lente et un indice glycémique réduit par rapport au témoin à base de riz, probablement en raison d'une teneur plus élevée en fibres et en RS (Molinari et al., 2018). Enfin, la vitesse d'hydrolyse de l'amidon dépend de ses propriétés structurales (morphologie des granules, rapport amylose/amylopectine, architecture moléculaire, degré de ramification) et des interactions avec les protéines et lipides (Singh *et al*., 2010).

L'indice glycémique (IG) et la charge glycémique (CG) des cookies diminuent avec l'augmentation de la concentration en carboxyméthylcellulose (CMC) (Naseer *et al*., 2021). Les hydrocolloïdes accroissent la viscosité et forment un film à la surface des granules d'amidon, limitant la diffusion de l'α-amylase et ralentissant l'hydrolyse (Singh *et al*., 2010). Cette réduction s'explique par les interactions CMC-amidon-lipides développés lors de la cuisson (Naseer *et al*., 2021). Les études révèlent toutefois d'importantes lacunes : les données sur les propriétés nutritionnelles et la digestibilité des cookies sans gluten demeurent fragmentaires. Leur développement reste calqué sur les standards des produits conventionnels, sans intégrer les besoins spécifiques des personnes astreintes à un régime d'éviction du gluten, lesquelles nécessitent des produits à valeur nutritionnelle renforcée.

Les efforts visant à aligner la production de cookies sans gluten sur les standards des produits à base de blé demeurent constants, mais ils s'accompagnent souvent de compromis nutritionnels et sensoriels au profit d'optimisations principalement technologiques **(Figure 11).**

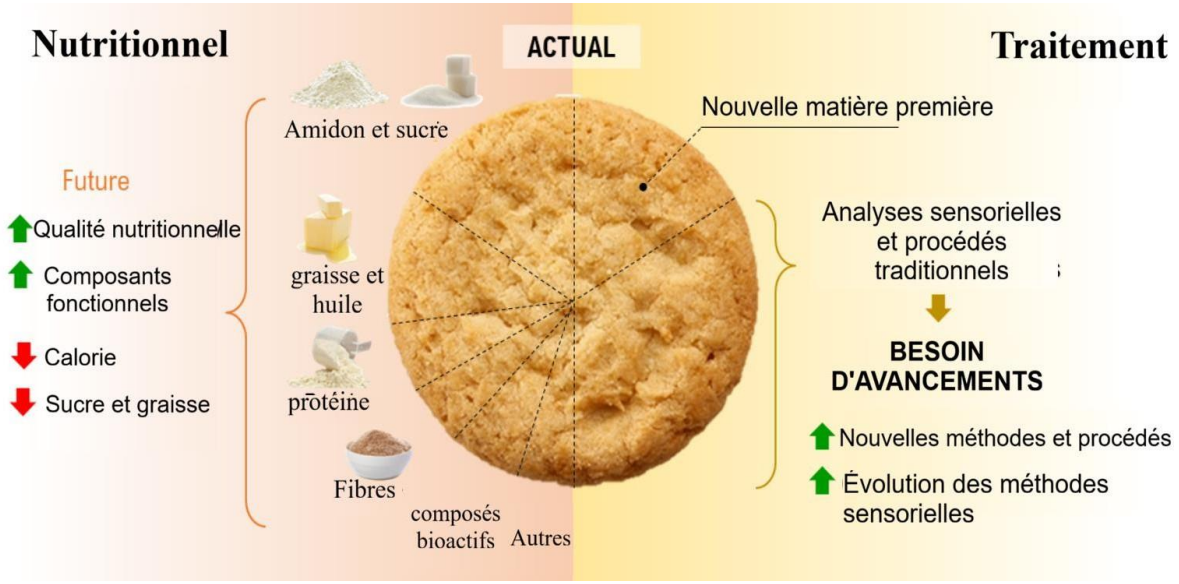


Figure 11 : Évolution des biscuits : de la composition nutritionnelle actuelle vers des formulations améliorées et des procédés innovants

Dans ce contexte, de nombreuses pistes d'innovation restent à explorer afin de diversifier et d'améliorer ces produits, particulièrement pertinents en raison de leur praticité et de leur stabilité de conservation. Les perspectives de développement doivent ainsi intégrer une amélioration conjointe des propriétés sensorielles, nutritionnelles et technologiques, tout en contribuant à une meilleure accessibilité sociale, économique et culturelle de ces produits (Silva *et al.*, 2021)

MATERIEL ET METHODES

1. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé pour cette étude correspond aux fruits de *Myrtus communis* L. Cette espèce a été sélectionnée en raison de ses propriétés aromatiques et thérapeutiques largement reconnues, ainsi que de sa richesse en composés bioactifs, en particulier les polyphénols. De plus, sa disponibilité naturelle et son excellente adaptation aux conditions pédoclimatiques de l'Algérie renforcent son intérêt pour cette étude (Beloued, 2005).

La récolte a été réalisée en novembre 2025 dans la région de Zefzaf, située dans la wilaya de Skikda, en Algérie.

Il est important de préciser que la zone de collecte n'a subi aucune intervention agricole, telle que le labour, la fertilisation ou les traitements phytosanitaires, ce qui assure un échantillonnage représentatif des conditions écologiques naturelles. Les fruits comestibles ont été récoltés à un stade optimal de maturité physiologique, puis soigneusement triés et nettoyés manuellement avant leur transfert au laboratoire pour analyse. Les échantillons ont été utilisés à l'état frais afin de préserver l'intégrité de leurs composés bioactifs.



Figure 12 : Ocimum basilicum *Myrtus communis* L.

1. Extraction

La macération est une méthode courante d'extraction solide-liquide, dans laquelle une matière solide est mise en contact avec un solvant. (Abidin *et al.*, 2013).

L'extraction de l'extrait phénolique des fruits de myrte a été réalisée en suivant le protocole décrit par Saini *et al.* (2019) avec quelques modifications. Un échantillon de 1 kg des fruits de myrte frais a été soigneusement sélectionné et préparé. Le processus d'extraction

a été réalisé par la macération de myrte dans un solvant d'éthanol à 96%. Cette étape a été réalisée pendant 24 heures à température ambiante, en veillant à protéger les échantillons de la lumière afin de prévenir toute dégradation photochimique. Après la macération, le mélange a été filtré pour séparer le liquide (filtrat) des résidus solides indésirables. Le solvant a ensuite été éliminé par évaporation à l'aide d'un évaporateur rotatif réglé à 70°C. Cette opération a permis de concentrer les composés phénoliques extraits de myrte en retirant le solvant de manière contrôlée. Enfin, les extraits concentrés ont été récupérés puis séchés dans une étuve maintenue à une température constante de 30 °C.

2. Encapsulation des composés phénoliques dans les souches de levure *Saccharomyces cerevisiae*

2.1 Culture de la souche de levure *Saccharomyces cerevisiae*

La souche de *Saccharomyces cerevisiae* a été employée dans cette étude. Les cellules levuriennes ont d'abord été cultivées sur des boîtes de Petri contenant un milieu Sabouraud, pendant une durée de 48 heures à une température de 27 °C. Par la suite, ces cultures ont servi à l'ensemencement d'un milieu liquide constitué de bouillon nutritif, ajusté à une densité optique initiale de 0,2 mesurée à 600 nm (DO 600). L'incubation a été réalisée à 27 °C sous agitation constante de 140 tours par minute. Les cellules ont été récoltées au cours de la phase exponentielle moyenne de croissance, puis soumises à trois cycles de lavage à l'aide d'une solution physiologique stérile (pH_2O). Chaque lavage a été effectué par centrifugation à 4000 tours par minute pendant 10 minutes (Nguyen *et al*., 2018).

2.2 Plasmolyse des souches de levures

Une masse de 40 g de levure a été mise en suspension dans 500 mL d'une solution de NaCl à 10 %. Le mélange obtenu a été soumis à un traitement de plasmolyse pendant 24 heures à une température contrôlée de 55 °C. À l'issue de cette étape, les cellules levuriennes ont été récupérées par centrifugation à une force de 2000 g durant 10 minutes. Le culot ainsi obtenu a ensuite été lavé avec de l'eau distillée, puis soumis à une agitation à température ambiante pendant 1 heure afin d'éliminer les résidus de NaCl, suivi d'une nouvelle centrifugation. Cette opération de lavage a été répétée à deux reprises pour assurer une élimination optimale du sel. Enfin, les cellules de levure ont été lyophilisées conformément à la méthode décrite par (Kurek *et al.*, 2023).

2.3 Microencapsulation des composés phénoliques

L'encapsulation des extraits phénoliques au sein des cellules de levure, qu'elles soient intactes ou plasmolysées, a été réalisée en milieu aqueux en respectant un rapport massique de 5 :1 entre la biomasse levurienne (intacte ou plasmolysée) et l'extrait phénolique. Un hydromodule de 1 :100 a été adopté pour cette opération. Le procédé d'encapsulation a été conduit dans un agitateur à régulation thermique, maintenu à une vitesse de 200 tours par minute, sous une température constante de 37 °C pendant une durée de 24 heures. À l'issue de cette étape, l'efficacité de l'encapsulation a été déterminée conformément à la méthode décrite par (Kalinina *et al.*, 2022).

2.4 Efficacité d'encapsulation

L'évaluation de l'efficacité d'encapsulation vise à déterminer la capacité des microcapsules à retenir les polyphénols, en exprimant le pourcentage de composés encapsulés par rapport à la teneur initiale avant encapsulation. Pour l'extraction des polyphénols totaux encapsulés, une masse de 0,2 g de poudre a été mise en contact avec 2 mL d'un mélange de solvants constitué de méthanol, d'acide acétique et d'eau. Le mélange a été soumis à une agitation pendant 30 minutes afin de favoriser l'extraction des composés phénoliques. Par la suite, une centrifugation a été réalisée à 3000 tours par minute pendant 10 minutes pour assurer la séparation des phases solide et liquide. Les teneurs en polyphénols totaux, en flavonoïdes et en tanins ont ensuite été quantifiées à l'aide de méthodes spectrophotométriques, conformément au protocole décrit par (Robert *et al.*, 2010).

3. Dosage des composés phénoliques

3.1 Dosage des polyphénols totaux

La détermination des polyphénols totaux repose sur l'utilisation du réactif de Folin-Ciocalteu, constitué d'acides phosphotungstique et phosphomolybdique. En présence de composés phénoliques, une réaction d'oxydoréduction se produit : les phénols sont oxydés tandis que le réactif est réduit, conduisant à la formation d'un complexe bleu composé d'oxydes de tungstène et de molybdène. L'intensité de cette coloration, dont le maximum d'absorption se situe entre 725 et 750 nm, est proportionnelle à la teneur en polyphénols dans l'échantillon. Le dosage des polyphénols dans les extraits de myrte, avant et après microencapsulation, a été réalisé selon la méthode décrite par (Waterhouse, 1999). Le

protocole consiste à mélanger 2 mL d'extrait avec 0,2 mL de réactif de Folin-Ciocalteu et 1,4 mL d'une solution de Na_2CO_3 à 7,5 % (m/v). Le mélange est ensuite incubé à l'obscurité, à température ambiante, pendant 2 heures (Singleton et Orthofer, 1999). L'absorbance est mesurée à 760 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-1800 (Shimadzu). Les résultats sont exprimés en milligrammes d'équivalent acide gallique par gramme d'extrait sec, sur la base d'une courbe d'étalonnage réalisée avec l'acide gallique, comportant 6 points de concentration compris entre 0 et 1 mg/mL (Kupina *et al*., 2018).

3.2 Dosage des flavonoïdes

La détermination de la teneur en flavonoïdes a été réalisée selon la méthode décrite par (Chang *et al*., 2002) avec certaines adaptations.

Cette approche repose sur la formation d'un complexe stable entre les groupements oxygénés des flavonoïdes (notamment aux positions C4 et C5) et le chlorure d'aluminium, conduisant à une coloration jaune caractéristique, dont l'absorbance maximale est observée à 415 nm. Pour la quantification des flavonoïdes dans les extraits de *Myrtus communis* L., encapsulés et non encapsulés, un volume de 0,2 mL de chaque échantillon a été mélangé avec 1,72 mL d'éthanol à 96 %, 0,4 mL de chlorure d'aluminium à 10 % et 1 mL d'acétate de sodium 1 M. Le mélange a ensuite été homogénéisé puis incubé à l'obscurité, à température ambiante, pendant 30 minutes.

L'absorbance a été mesurée à 415 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-1800 (Shimadzu). Les résultats ont été exprimés en milligrammes équivalent quercétine par gramme d'extrait sec, sur la base d'une courbe d'étalonnage établie à partir de la quercétine (Chang *et al*., 2002).

4. Évaluation de l'effet de la microencapsulation sur l'activité antioxydante

L'impact de la microencapsulation sur l'activité antioxydante des extraits de myrte a été étudié à l'aide de la méthode de piégeage du radical libre DPPH.

4.1 Méthode DPPH

Le test au DPPH (2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle) constitue une méthode de référence pour l'évaluation de l'activité antioxydante en milieu organique. Il repose sur la réduction du radical stable DPPH par un composé antioxydant donneur d'hydrogène (AH), conduisant à la formation de la molécule non radicalaire DPPH-H. En solution alcoolique, le DPPH présente une coloration pourpre intense avec une absorption maximale à 517 nm. L'ajout d'un

antioxydant provoque une diminution de cette coloration, traduisant une réduction du radical et une modification mesurable de l'absorbance (Blois, 1958).

Pour la détermination de l'activité antioxydante, une solution de DPPH est préparée en dissolvant 10mg de DPPH dans 100 mL d'éthanol, afin d'obtenir une concentration finale de 0,01 mM. Les échantillons à analyser sont également dissous dans l'éthanol, puis ajoutés à la solution de DPPH à une concentration (10mg/mL). Les mélanges sont incubés à température ambiante, à l'abri de la lumière, pendant 30 minutes. À l'issue de cette incubation, l'absorbance est mesurée à 517 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible.

TPE : correspond à la concentration totale de polyphénols, flavonoïdes et tanins encapsulés.

TPT : Désigne la concentration de composés phénoliques (polyphénols, flavonoïdes et tanins) de l'extrait non encapsulé (Cegledi *et al*., 2022).

5. Élaboration des cookies sans gluten fonctionnelles à base de microcapsules d'extraits phénoliques de myrte

5.1 Matières premières

Toutes les matières premières utilisés dans cette étude pour la formulation des cookies sans gluten à caractère nutritionnel et fonctionnel reposent sur l'utilisation des matières premières suivantes : farine de riz, farine de maïs, farine d'amande, fécule de tapioca, gomme xanthane, levure chimique, sel, matière grasse (huile de coco), sucre (sucre de dattes), œufs frais et extrait de vanille. Ces ingrédients ont été achetés dans un commerce de détail local (Skikda) ainsi que chez des fournisseurs spécialisés. L'extrait phénolique de myrte (*Myrtus communis* L.) a été obtenu par un procédé d'éco-extraction, puis soumis à une microencapsulation selon le protocole décrit par (kalinina *et al.,* 2022), en utilisant des cellules de levure *Saccharomyces cerevisiae* comme matériau de paroi.

5.2 Formulation des cookies sans gluten

Cette étude a permis de concevoir quatre formulations distinctes de cookies sans gluten, élaborées à partir d'ingrédients de base communs et en appliquant une méthodologie de formulation standard **(Tableau 3).**

La variable indépendante correspond à la nature de l'enrichissement incorporé dans les formulations de cookies, réparties comme suit :

- Sans ajout (témoin),

- Avec extrait phénolique libre de *Myrtus communis* L.,
- Avec extrait microencapsulé dans des cellules de levure intactes,
- Avec extrait microencapsulé dans des cellules de levure plasmolysées

Farine de riz constitue la farine de base la plus utilisée dans les cookies sans gluten (62,3 % des études recensées) en raison de sa couleur claire, de sa saveur neutre et de son faible pouvoir allergène (Melo *et al.*, 2023 ; Xu *et al.*, 2020).

Farine de maïs présente dans 35,5 % des formulations, elle apporte une coloration dorée et une texture légèrement sablée. Associée à la farine de riz, elle équilibre le profil gustatif et technologique (Melo *et al.*, 2023).

Farine d'amande source de protéines végétales (65 % des études incluent une protéine végétale), elle améliore la valeur nutritionnelle en apportant des lipides insaturés, des fibres et des antioxydants. Elle contribue également à réduire la dureté du cookie final (Xu *et al.*, 2020).

Fécule de tapioca a été utilisée pour améliorer le croustillant et la tenue des cookies. Les amidons modifient la gélatinisation et donc la texture finale (Xu *et al.*, 2020 ; Paciulli et *al.*, 2018).

Gomme xanthane ; hydrocolloïde présent dans 45 % des études sur cookies sans gluten. Il mime la viscoélasticité du gluten, améliore la rétention d'eau et la cohésion de la pâte (Melo *et al*., 2023 ; Xu *et al*., 2020*)*.

Huile de coco ; la matière grasse est indispensable à la tendreté et au croustillant. 100 % des formulations étudiées contiennent des lipides, principalement sous forme de beurre ou d'huile végétale (Melo *et al*., 2023).

Sucre des dattes) ; le sucre contribue à la structure vitreuse du cookie après refroidissement. 84 % des études utilisent du sucre raffiné, mais le sucre de coco peut être substitué pour un index glycémique plus bas *(Xu et al., 2020)*.

Œuf ; agit comme émulsifiant et améliore la cohésion, la couleur et la valeur nutritionnelle. 65 % des études intègrent une protéine animale (Melo *et al.*, 2023).

Dans une optique d'enrichissement fonctionnel, l'extrait phénolique de *Myrtus communis* L., obtenu par éco-extraction, a été introduit dans la formulation des cookies sans gluten, soit sous sa forme native, soit après microencapsulation. Cette dernière technique

repose sur l'utilisation de cellules levuriennes (intactes ou plasmolysées) comme biostructures, afin d'améliorer la stabilité, la biodisponibilité et le profil de libération des composés phénoliques, tout en atténuant leurs effets indésirables sur les propriétés sensorielles du produit final.

L'incorporation a été réalisée à trois niveaux : 0,02 %, 0,03 % et 0,05 % de la masse totale de la formulation. Ces concentrations s'inscrivent dans la fourchette recommandée par la littérature pour les extraits végétaux polyphénoliques dans les matrices alimentaires solides, où le seuil de 1 % n'est généralement pas dépassé afin d'éviter des altérations organoleptiques telles que l'amertume, l'astringence ou des modifications texturales (Robertson *et al*., 2016 ; Lucas *et al*., 2020 ; Paternina *et al*., 2022).

Cette démarche de formulation visait ainsi à concevoir un produit innovant, intégrant un extrait végétal bioactif encore peu exploité industriellement, tout en préservant les qualités nutritionnelles et sensorielles attendues d'un cookie sans gluten fonctionnel.

5.3 Protocole de formulation

La formulation des cookies sans gluten a été réalisée selon le protocole proposé par (Melo *et al*. 2023 ; Xu *et al*. 2020) avec des modifications visant à adapter la méthode à un enrichissement fonctionnel. Les matières premières ont été soigneusement pesées selon les proportions définies **(Tableau 3)**.

Tableau 3 : Ingrédients utilisés pour la formulation des cookies sans gluten (exprimés en grammes pour 100 g de farines totales, sauf mention contraire)

Ingrédients	**Echantillons**			
	Cookie témoin (BT)	**Cookie avec extrait libre (CEL)**	**Cookie avec microcapsules – cellules intactes (CMCI)**	**Cookie avec microcapsules – cellules plasmolysées (CMCP)**
Farine de riz	40	40	40	40
Farine de maïs	25	25	25	25

Farine d'amande	20	20			20			20	
Fécule de tapioca	10	10			10			10	
Gomme xanthane	0,8	0,8			0,8			0,8	
Levure chimique	2	2			2			2	
Sel	0,8	0,8			0,8			0,8	
Beurre (ou huile de coco)	45	45			45			45	
Sucre (ou sucre de coco)	35	35			35			35	
Œuf	50	50			50			50	
Extrait de vanille	1	1			1			1	
Extrait phénolique libre	-	0.02	0.03	0.05	-			-	
Microcapsules (cellules intactes)	-	-			0.02	0.03	0.05	-	
Microcapsules (cellules plasmolysées)	-	-			-			0.02	0.03	0.05

Pour le crémage l'huile de coco (ou beurre) et le sucre sont mélangés pendant 3 à 4 minutes dans un bol, à l'aide d'un batteur électrique ou d'une spatule, jusqu'à obtention d'un mélange crémeux et homogène.

L'œuf et l'extrait de vanille sont ajoutés progressivement au mélange beurre-sucre, puis mélangés jusqu'à complète homogénéisation.

Selon la formulation, l'extrait phénolique libre ou les microcapsules (0,02 % ; 0,03 % et 0,05 % de du poids total) sont ajoutés en ce lieu, à l'exception du témoin qui n'en contient pas. Le mélange est homogénéisé manuellement pour assurer une distribution uniforme des composés bioactifs.

Dans un autre récipient, toutes les farines (riz, maïs, amande), la fécule de tapioca, la gomme xanthane, la levure chimique et le sel sont tamisées ensemble. Ce mélange sec est ensuite incorporé progressivement au mélange liquide, en mélangeant délicatement à la spatule.

La pâte obtenue est enveloppée dans un film plastique est placée au réfrigérateur à 4 °C pendant 20 minutes. Ce temps de repos permet une hydratation complète des farines sans gluten et des hydrocolloïdes, favorisant ainsi la texture finale du cookie.

Des disques de pâte de 25 g sont formés manuellement, puis déposés sur une plaque recouverte de papier cuisson, en les espaçant d'environ 5 cm. Chaque disque est légèrement aplati avec le dos d'une spatule.

Les cookies sont cuits au four préchauffé à 170–180 °C pendant 10 à 12 minutes. Ces conditions de cuisson sont standards pour les cookies sans gluten et permettent d'obtenir un croustillant optimal sans brûlure.

Après cuisson, les cookies sont laissés sur la plaque pendant 5 minutes, puis transférés sur une grille métallique pour un refroidissement complet de 30 minutes à température ambiante. Ce refroidissement progressif est essentiel pour la fixation de la structure vitreuse et la texture finale.

Chaque cookie est ensuite conditionné individuellement dans des sachets en polyéthylène basse densité (PEBD) ou dans des boîtes hermétiques, puis conservé à température ambiante, à l'abri de la lumière, jusqu'aux analyses ultérieures. Le produit final, sous forme de cookie sans gluten sain et fonctionnel, a été formulé sans conservateurs ni

édulcorants artificiels, puis évalué selon diverses propriétés organoleptiques, physico-chimiques et nutritionnelles.

6. La caractérisation de formulation des cookies sans gluten

6.1 Dosage des polyphénols

Le dosage des polyphénols a été réalisé selon la méthode décrite par (Waterhouse, 1999).

6.2 Dosage des flavonoïdes

ALa détermination de la teneur en flavonoïdes a été réalisée selon la méthode décrite par (Chang *et al.*, 2002) avec certaines adaptations.

6.3 Activités antioxydante

Etudié à l'aide de la méthode de piégeage du radical libre DPPH (Blois, 1958).

7. Analyse physico-chimique

La caractérisation physico-chimique des échantillons, incluant la détermination de l'activité de l'eau, du pH, du degré °Brix, de la teneur en humidité ainsi que du taux de cendres, a été réalisée selon les méthodes officielles standardisées de l'Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 1984). Afin de garantir la fiabilité et la reproductibilité des résultats, chaque analyse a été effectuée en triplicat.

7.1 Activité de l'eau (wa)

L'activité de l'eau (wa) des échantillons a été mesurée à l'aide d'un hygromètre AquaLab (Decagon Devices, Inc., série 4TE), en utilisant une solution étalon présentant une aw de 0,760, à une température constante de 25 °C. L'appareil repose sur la méthode du point de rosée par miroir refroidi, où la température de rosée correspond à celle à laquelle la vapeur d'eau en équilibre avec l'échantillon commence à se condenser. Cette condensation est obtenue sur un miroir métallique refroidi par circulation de fluide ou par effet Peltier. Les échantillons ont été placés dans des cylindres en plastique (hauteur : 1 cm ; diamètre : 4 cm) puis introduits dans la chambre de mesure. Après calibration du capteur, les mesures ont été effectuées.

7.2 pH

La détermination du pH a été réalisée sur des extraits obtenus en homogénéisant 2 g de chaque échantillon de barres énergétiques dans 20 mL d'eau distillée à 25 °C. La mesure du pH a été effectuée à l'aide d'un pH-mètre numérique (Hanna Instruments, HI2211 pH/ORP Meter), équipé d'une électrode de pénétration et d'une sonde de température. L'appareil a été préalablement calibré à l'aide de solutions tampons de pH 4, 7 et 9, avant la réalisation des mesures sur les échantillons.

7.3 Extrait sec soluble (°Brix)

La détermination de l'extrait sec soluble (°Brix) a été réalisée à partir d'un homogénat obtenu en mélangeant 2 g de chaque échantillon de barres énergétiques avec 20 mL d'eau distillée. La mesure a ensuite été effectuée à l'aide d'un réfractomètre portable (Atago HHR-2N Humidity).

7.4 Teneur en humidité (H%)

La teneur en humidité (H %) des échantillons a été déterminée par séchage d'environ 4 g de chaque échantillon dans une étuve à air forcé réglée à 105 °C pendant 24 heures, jusqu'à obtention d'un poids constant. Le taux d'humidité a été calculé selon l'équation suivante :

$$H\,(\%) = [(p1 - p2) - p] \div [p2]$$

Où :

H (%) : teneur en humidité exprimée en pourcentage massique ;

P1 : masse de la capsule (g) ;

P2 : masse de l'échantillon prélevé (g) ;

P : masse de la capsule contenant l'échantillon après séchage (g).

7.5 Teneur en cendres totales

La teneur en cendres totales a été déterminée par incinération des échantillons dans un four à moufle réglé à 600 °C pendant 6 heures. Une masse précise de l'échantillon a été pesée dans un creuset propre, préalablement séché et taré. Le creuset a ensuite été introduit dans le four pour la calcination. Après refroidissement complet dans un dessiccateur, il a été de nouveau pesé afin de déterminer la masse résiduelle.

Le pourcentage de cendres a été calculé selon la formule suivante :

$$Teneur\ en\ cendres\ (\%) = [(M2 - T) \div (M1)] \times 100$$

Où :

M1 : masse de l'échantillon initial (g) ;

M2 : masse du creuset après incinération (g) ;

T : masse du creuset vide (taré) (g).

8. Analyse nutritionnelle

8.1 Teneur en protéines

La teneur en protéines brutes a été déterminée selon la méthode de Kjeldahl (AOAC, 2005), fondée sur la quantification de l'azote total contenu dans l'échantillon. La teneur en protéines est ensuite estimée par application d'un facteur de conversion adapté à la matrice étudiée (généralement égal à 6,25 pour les produits alimentaires). Cette méthode analytique repose sur trois étapes essentielles :

- La minéralisation de l'azote organique par digestion acide en présence de catalyseurs.
- La distillation de l'ammoniac libéré en milieu alcalin.
- Le titrage de l'azote ammoniacal recueilli à l'aide d'un acide fort en présence d'un indicateur coloré.

8.1.1 Minéralisation

Une masse de 2 g d'échantillon sec a été introduite dans un ballon Kjeldahl préalablement nettoyé et séché. Ensuite, 15 mL d'acide sulfurique concentré (H_2SO_4) ont été ajoutés, suivis d'un mélange catalytique constitué de sulfate de potassium et de sulfate de cuivre, afin d'accélérer la dégradation de la matière organique. Le mélange réactionnel a été chauffé progressivement jusqu'à l'obtention d'une solution limpide de teinte verdâtre, indiquant l'achèvement de la minéralisation. Le ballon a ensuite été laissé à refroidir à température ambiante avant la poursuite de l'analyse.

8.1.2 Distillation

Après refroidissement, 50 mL d'une solution de soude concentrée (NaOH à 40 %) ont été ajoutés afin de rendre le milieu fortement alcalin et de favoriser la libération de l'ammoniac. Le ballon a ensuite été raccordé à un distillateur de Kjeldahl. L'ammoniac volatilisé a été entraîné et piégé dans 50 mL d'une solution d'acide borique à 4 %, contenant quelques gouttes d'un mélange d'indicateurs colorés (rouge de méthyle et bleu de bromothymol), permettant de suivre visuellement les variations de pH au cours du titrage. La distillation a été poursuivie jusqu'à l'obtention d'environ 150 mL de distillat, garantissant une récupération quantitative de l'ammoniac.

8.1.3 Titrage

Le distillat obtenu a été titré par une solution d'acide chlorhydrique (HCl) à 0,1 N, jusqu'au virage de l'indicateur, caractérisé par un passage de la couleur verte au rose, correspondant au point d'équivalence (AOAC, 2005).

Calcul

L'azote total est calculé selon la formule suivante :

$$\text{Azote (□) \%} = \{[(V_{\text{échantillon}} - V_{\text{blanc}}) \times N \times 14{,}01]/m\} \times 100$$

Où :

V : volume d'acide titrant utilisé (en mL) ;

N : normalité de l'acide (en N) ;

14,01 : masse molaire de l'azote (mg/mmol) ;

M : masse de l'échantillon (en mg ou g selon les unités choisies).

La teneur en protéines est ensuite obtenue par :

$$\text{Protéines \%} = \text{Azote \%} \times \text{facteur de conversion}$$

8.2 Teneur en lipides

La teneur en lipides a été déterminée par extraction continue selon la méthode de méthode Soxhlet (Soxhlet, 1879 ; AOAC, 2005), en utilisant l'éther éthylique comme solvant d'extraction. Une masse précisément pesée de chaque échantillon a été introduite dans une cartouche en cellulose à usage unique, perméable aux solvants et aux lipides.

L'extraction a été réalisée en continu à l'aide d'un dispositif Soxhlet, dans lequel l'éther éthylique a été porté à ébullition (point d'ébullition ≈ 35 °C). Les vapeurs du solvant se sont condensées puis ont percolé à travers l'échantillon, assurant la solubilisation progressive des lipides. Le solvant enrichi en matière grasse a ensuite été récupéré dans le ballon d'extraction par des cycles successifs de siphonnage via le tube latéral de l'appareil. Lors de chaque cycle, seul le solvant s'est évaporé à nouveau, permettant l'accumulation progressive des lipides dans le ballon. Ce processus a été répété jusqu'à extraction complète des composés lipidiques.

À l'issue de l'extraction, le solvant a été éliminé à l'aide d'un évaporateur rotatif, et le résidu lipidique obtenu a été séché puis pesé afin de déterminer la masse de matière grasse extraite.

Calcul de la teneur en matière grasse.

La teneur en lipides est exprimée en pourcentage de la masse initiale de l'échantillon, selon la relation suivante :

$$\text{Matière grasse \%} = [(W2 - W1) \div (W3)] \times 100$$

Où :

W1 : masse de la fiole vide (g) ;

W2 : masse de la fiole contenant la matière grasse extraite (g) ;

W3 : masse de l'échantillon initial (g).

8.3 Teneur en glucides

La teneur en glucides totaux a été déterminée par calcul indirect, selon la méthode de différence décrite par (Bertrand et Thomas, 1910). Cette approche consiste à estimer la fraction glucidique comme étant la proportion résiduelle de l'échantillon après soustraction des principaux constituants analytiquement mesurés, à savoir l'humidité, les protéines, les lipides et les cendres. L'expression de la teneur en glucides totaux est donnée par l'équation suivante :

Glucides totaux % = 100 – (Humidité % + Protéines % + Lipides % + Cendres %)

8.4 Valeur calorique

La valeur énergétique des échantillons a été estimée par calcul, conformément à la méthode proposée par (Coleman, 1970), fondée sur les facteurs de conversion énergétique établis par (Atwater et Rosa, 1899). Cette méthode repose sur l'attribution de coefficients caloriques spécifiques aux macronutriments, soit 4 kcal/g pour les protéines, 4 kcal/g pour les glucides totaux et 9 kcal/g pour les lipides. La valeur énergétique totale est obtenue par la somme des contributions individuelles de ces nutriments, selon la relation suivante :

E (kcal/100g) = (4× Protéines %) + (4 × Glucides %) + (9 × Lipides %)

9. Analyse sensorielle des cookies sans gluten

L'évaluation sensorielle des cookies sans gluten a été réalisée selon un protocole combinant un test descriptif et un test d'acceptabilité. Quatre séries d'échantillons ont été préparées : une série témoin (sans extrait), une série contenant un extrait aux concentrations 0.02 %, 0.03 % et 0.05 %, une série refermant un extrait encapsulé aux mêmes proportions, et une série issue d'un traitement par plasmolyse (0.02 %, 0.03 %, 0.05 %). Chaque cookie a été découpé en portions calibrées (épaisseur d'environ 2 cm) puis présenté dans assiettes jetables codés avec un identifiant aléatoire à trois chiffres, garantissant l'anonymat des échantillons.

Le panel de dégustation était composé d'étudiants sains, non-fumeurs et exempts d'allergie connue aux ingrédients. Les participants ont été isolés individuellement ou répartis en petits groupes sans interaction durant l'épreuve, afin d'éviter toute influence mutuelle.

Chaque dégustateur a reçu une fiche d'évaluation, un gobelet d'eau minérale plate à température ambiante, ainsi qu'un jeu de couverts jetables. Les attributs suivants ont été successivement notés : apparence globale, couleur, croustillance, friabilité, dureté, adhésivité, arôme, goût global. Une échelle hédonique linéaire à neuf points a été utilisée (1 = « je n'aime pas du tout », 5 = « neutre », 9 = « j'aime extrêmement »).

La procédure opératoire a respecté l'ordre suivant : les échantillons ont été présentés dans une séquence aléatoire (carré latin) pour neutraliser les effets de rang. Pour chaque cookie, le participant observait d'abord l'aspect visuel, puis inspirait les effluves avant de prélever une petite bouchée. La mastication lente a permis d'apprécier les propriétés texturales et la flaveur.

Chaque note était immédiatement reportée sur la fiche. Entre deux échantillons, un rinçage de la bouche à l'eau plate était imposé, suivi d'une pause minimale de trente secondes. L'ensemble des données recueillies a fait l'objet d'un calcul de la moyenne arithmétique par attribut et par échantillon, permettant de comparer l'effet des différents traitements (extrait, encapsulé, plasmolyse) par rapport au témoin et d'identifier les qualités et défauts perçus des cookies sans gluten.

10. Analyse statistique

Le calcul des moyennes plus ou moins l'écart type des trois répétitions ainsi que les représentations graphiques ont été effectués par Excel 2013 (Microsoft Excel Version 3. 2013, Microsoft Corp., Redmond, WA, USA). Un test ANOVA à un seul facteur suivi par test Post hoc Tukey a été réalisé à l'aide du logiciel Minitab® LLC (MinitabStatistical Software for windowsreleased 2019, version 19.1.1.0, Minitab, LLC sis 1829 Pine Hall Road, State College, PA, USA) pour comparer moyennes obtenues. Les lettres en exposant ; a, b, c, d indiquent une différence significative au seuil de signification 0,05.

RESULTATS ET DISCUSSION

1. Teneurs en composés phénoliques

1.1 Effet de la microencapsulation sur la teneur en composés phénoliques de *Myrtus communis* L.

Les résultats relatifs à la teneur en composés phénoliques des différents extraits sont présentés dans **(Figure 13).**

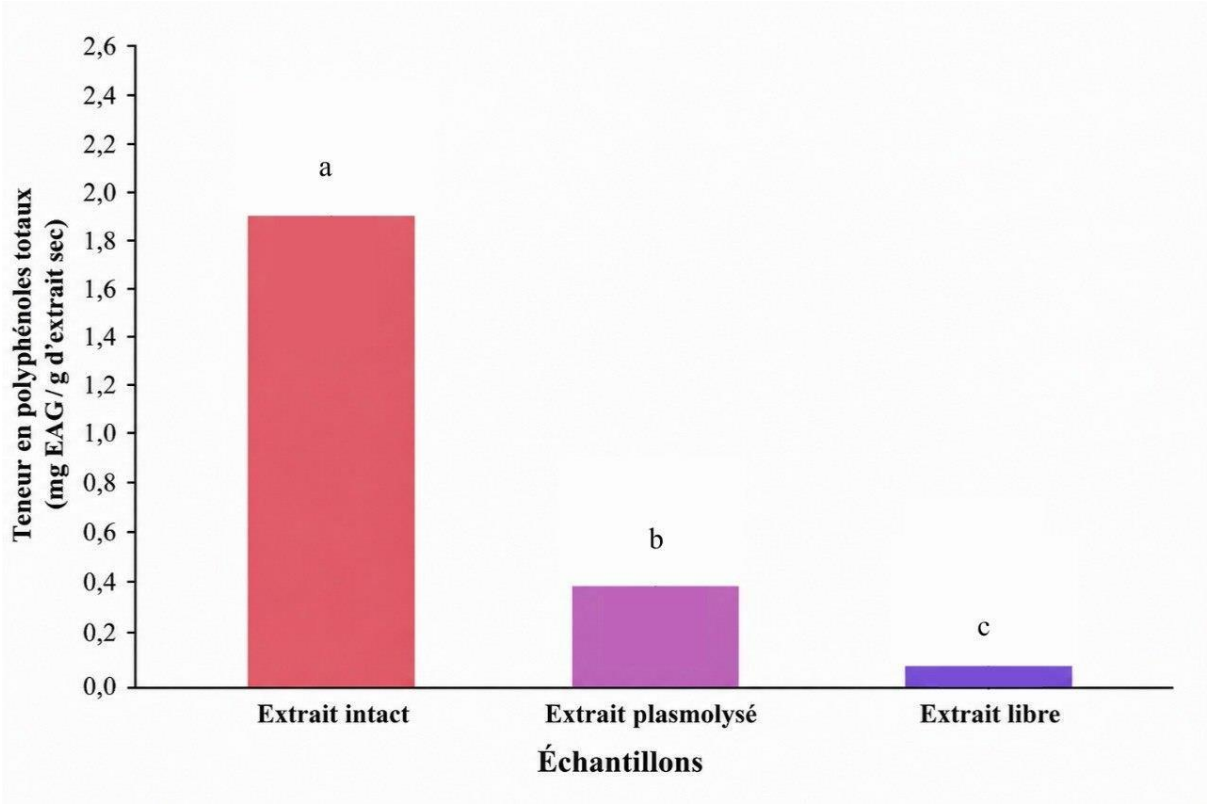


Figure 13 : Teneur en polyphénols totaux des différents extraits (intact, plasmolysé et libre)

***Les résultats sont exprimés en mg d'équivalents d'acide gallique par gramme d'extrait sec (mg EAG/g ES).Les valeurs représentent la moyenne ± écart-type (n = 3). Les différentes lettres (a,b,c) indiquent des différences significatives (p < 0,05) selon le test de Tukey.**

Les résultats relatifs à la teneur en composés phénoliques totaux, exprimée en milligrammes d'équivalent d'acide gallique par gramme d'extrait sec (mg EAG/g), ont mis en évidence des différences statistiquement significatives entre les trois traitements étudiés ($p < 0,05$). L'extrait encapsulé intact a présenté la teneur la plus élevée en composés phénoliques (1,908 ± 0,339 mg EAG/g), suivi de l'extrait encapsulé plasmolysé (0,378 ± 0,161 mg EAG/g), tandis que l'extrait libre a enregistré la valeur la plus faible (0,072 ± 0,076 mg EAG/g). Les différences observées entre les trois modalités traduisent un effet significatif de

la forme d'incorporation de l'extrait sur la préservation des composés phénoliques dans les cookies sans gluten.

Ces résultats sont cohérents avec ceux rapportés par Dellapina *et al.* (2025), qui ont étudié l'incorporation d'extraits issus de sous-produits d'agrumes encapsulés dans des cookies sans gluten à base d'avoine et de sarrasin. Les auteurs ont montré que l'encapsulation permettait de préserver efficacement les polyphénols au cours du traitement thermique, avec un taux de rétention supérieur à 85 % après cuisson à 230 °C. Dans cette étude, les formulations contenant les extraits encapsulés présentaient des teneurs en composés bioactifs significativement plus élevées que celles enrichies en extraits libres. Cette observation concorde avec les résultats obtenus dans la présente étude, où l'extrait encapsulé intact a conservé la plus forte concentration en composés phénoliques après son incorporation dans la matrice alimentaire.

Des résultats similaires ont également été rapportés par Křišťanová *et al.* (2023), qui ont souligné que les systèmes d'encapsulation constituent une stratégie efficace pour protéger les composés phénoliques contre les effets combinés de la chaleur, de l'oxygène et de l'humidité. Selon ces auteurs, la présence d'une barrière physique autour des molécules bioactives réduit leur dégradation et améliore leur stabilité lors des procédés technologiques. La teneur élevée observée dans l'extrait encapsulé intact de la présente étude confirme ainsi le rôle protecteur de l'encapsulation vis-à-vis des réactions d'oxydation et de dégradation thermique.

À l'inverse, les résultats obtenus pour l'extrait libre rejoignent les observations de Breschi *et al.* (2024), qui ont étudié l'enrichissement de cookies sans gluten à l'aide d'extraits de pomme et de grenade incorporés sous forme non encapsulée. Les auteurs ont rapporté une rétention très limitée des composés phénoliques après cuisson, inférieure à 15 % dans le cas de l'extrait de grenade. Cette diminution importante a été attribuée à l'exposition directe des polyphénols aux températures élevées et aux phénomènes d'oxydation. Dans la présente étude, la faible teneur observée pour l'extrait libre (0,072 ± 0,076 mg EAG/g) confirme la forte vulnérabilité des composés phénoliques lorsqu'ils ne bénéficient d'aucune protection physique.

L'analyse des résultats met également en évidence l'importance de l'intégrité structurale des capsules dans la préservation des composés bioactifs. La supériorité de l'extrait encapsulé intact peut être attribuée à l'effet barrière exercé par la paroi des capsules, qui limite les échanges avec le milieu extérieur et protège les molécules phénoliques contre les contraintes thermiques et oxydatives (Křišťanová *et al.*, 2023 ; Dellapina *et al.*, 2025).

En revanche, l'extrait encapsulé plasmolysé a présenté une teneur intermédiaire significativement inférieure à celle de l'extrait encapsulé intact. Cette diminution suggère que la plasmolyse altère partiellement la structure protectrice de la capsule, augmentant ainsi la perméabilité de la paroi et favorisant la diffusion des composés phénoliques vers le milieu environnant. Néanmoins, la teneur en polyphénols demeure significativement supérieure à celle de l'extrait libre, indiquant que la protection apportée par les capsules n'est pas totalement perdue malgré l'altération de leur structure.

Par ailleurs, les faibles teneurs enregistrées dans l'extrait libre peuvent également être expliquées par les interactions entre les composés phénoliques et les constituants de la matrice biscuitière. Les polyphénols sont susceptibles de former des complexes avec les protéines et les polysaccharides présents dans la pâte, réduisant ainsi leur extractibilité et leur quantification analytique après cuisson (Fărcaș *et al.,* 2022). Ce phénomène, combiné à la dégradation thermique et oxydative, pourrait expliquer les pertes importantes observées dans les formulations contenant l'extrait libre.

Dans l'ensemble, les résultats démontrent clairement que l'encapsulation constitue une stratégie efficace pour améliorer la rétention des composés phénoliques dans les cookies sans gluten. L'extrait encapsulé intact a assuré la meilleure préservation des polyphénols, tandis que l'extrait encapsulé plasmolysé a fourni une protection intermédiaire. Ces observations confirment que l'intégrité physique des capsules représente un facteur déterminant dans la stabilité des composés bioactifs et soulignent l'intérêt du développement de systèmes d'encapsulation robustes pour l'enrichissement fonctionnel des produits de boulangerie sans gluten (Křišťanová *et al.,* 2023 ; Fărcaș *et al.,* 2022 ; Dellapina *et al.,* 2025).

1.2 Effet de l'enrichissement en extrait sur les teneurs en composés phénoliques des cookies sans gluten

Afin d'examiner l'influence de l'enrichissement en extrait sur la teneur en composés phénoliques des cookies sans gluten, les teneurs en polyphénols totaux ont été déterminées en fonction de la forme de l'extrait incorporé (extrait libre, extrait encapsulé dans des cellules intactes et extrait encapsulé dans des cellules plasmolysées) ainsi que de la concentration d'incorporation appliquée. Les données obtenues ont fait l'objet d'une analyse statistique par analyse de la variance (ANOVA), suivie du test de Tukey pour la comparaison des moyennes. Les résultats correspondants sont présentés dans le **(Tableau 4)**

Tableau 4 : Teneurs en polyphénols totaux (mg EAG/g d'extrait sec) des cookies sans gluten enrichis par différentes formes d'extrait de *Myrtus communis* L. à diverses concentrations d'incorporation.

Type d'extrait	**Concentration (%)**	**Polyphénols totaux (mg EAG g^{-1} ES)**
Témoin	–	$0,87 \pm 0,17^{e}$
Extrait libre	0,02	$0,96 \pm 0,41^{e}$
	0,03	$1,22 \pm 0,08^{e}$
	0,05	$3,51 \pm 0,22^{d}$
Extrait encapsulé dans des cellules de levure intactes	0,02	$10,06 \pm 0,64^{c}$
	0,03	$28,82 \pm 1,82^{b}$
	0,05	$82,57 \pm 5,22^{a}$
Extrait encapsulé dans des cellules de levure plasmolysées	0,02	$1,71 \pm 0,49^{e}$
	0,03	$1,74 \pm 0,28^{e}$
	0,05	$0,37 \pm 0,02^{e}$

Les données sont exprimées en moyenne ± écart-type (n = 3). Les lettres en exposant (a,b,c,d, e,f ,g) indiquent les groupes statistiques obtenus par le test de Tukey ($p < 0,05$).

La teneur en polyphénols totaux des cookies sans gluten, exprimée en mg EAG/g d'extrait sec, a été significativement influencée par la forme d'incorporation de l'extrait ainsi que par la concentration utilisée. Le cookie témoin a présenté la plus faible teneur en polyphénols (0,87 ± 0,17 mg EAG/g d'extrait sec), reflétant l'absence d'apport exogène en composés phénoliques. L'incorporation de l'extrait libre a entraîné une augmentation progressive de la teneur en polyphénols avec l'augmentation de la concentration, atteignant 3,51 ± 0,22 mg EAG/g d'extrait sec à 0,05 %. Toutefois, aux faibles concentrations, les valeurs sont restées relativement proches de celles du témoin, indiquant une efficacité limitée de cette forme d'incorporation pour préserver les composés phénoliques durant la transformation.

Les cookies enrichis avec l'extrait encapsulé dans des cellules de levure intactes ont présenté les teneurs les plus élevées, comprises entre 10,06 et 82,57 ± 5,22 mg EAG/g d'extrait sec selon la concentration appliquée. Cette augmentation substantielle témoigne de la capacité remarquable de la matrice cellulaire intacte à protéger les composés phénoliques contre les phénomènes de dégradation thermique et oxydative induits par la cuisson. À

l'inverse, les formulations contenant l'extrait encapsulé dans des cellules plasmolysées ont affiché des teneurs nettement plus faibles, variant de 0,37 à 1,74 mg EAG/g d'extrait sec, des valeurs souvent proches de celles du témoin. Cette observation suggère une efficacité réduite du système d'encapsulation après plasmolyse, probablement en raison des modifications structurelles de la paroi cellulaire et de l'augmentation de la perméabilité membranaire favorisant la diffusion et la dégradation des composés bioactifs.

Ces résultats sont en accord avec les observations rapportées par Dellapina *et al.* (2025), qui ont étudié l'enrichissement de cookies sans gluten à base de farines d'avoine et de sarrasin à l'aide d'extraits d'agrumes riches en flavonoïdes. Les auteurs ont démontré que l'encapsulation permettait de préserver plus de 85 % des flavonoïdes après une cuisson à 230 °C, conduisant à une augmentation significative de la teneur en composés phénoliques des produits finis. De manière similaire, les résultats obtenus dans la présente étude mettent en évidence l'efficacité de l'encapsulation pour améliorer la rétention des polyphénols au sein de la matrice biscuitière, particulièrement lorsque les cellules de levure conservent leur intégrité structurale.

L'amélioration observée avec les cellules intactes peut être attribuée à plusieurs mécanismes complémentaires. La paroi cellulaire de Saccharomyces cerevisiae, riche en β-glucanes, mannoprotéines et chitine, agit comme une barrière physique limitant l'exposition des polyphénols à l'oxygène, à la chaleur et aux réactions de dégradation durant la cuisson. De plus, les interactions entre les composés phénoliques et les constituants de la paroi cellulaire favorisent leur rétention à l'intérieur des microcapsules et réduisent leur diffusion vers l'environnement extérieur. Ces mécanismes contribuent à préserver l'intégrité chimique des polyphénols et à maintenir leur concentration dans le produit final.

En revanche, les faibles teneurs observées dans les formulations contenant les cellules plasmolysées peuvent être associées aux modifications induites par le traitement de plasmolyse. Ce procédé entraîne une désorganisation partielle des structures intracellulaires et une augmentation de la porosité de la paroi, facilitant la libération prématurée des composés encapsulés. Les polyphénols deviennent alors davantage exposés aux conditions sévères de cuisson, favorisant leur oxydation, leur dégradation thermique ou leur interaction avec les protéines et les polysaccharides de la matrice alimentaire. Des phénomènes similaires ont été décrits par Anal et Singh (2007), qui ont souligné l'importance de l'intégrité structurale des systèmes d'encapsulation dans la protection des composés bioactifs.

Par ailleurs, les teneurs relativement faibles observées dans les échantillons enrichis avec l'extrait libre confirment la sensibilité des polyphénols aux procédés thermiques. Les

températures élevées de cuisson peuvent provoquer des réactions d'oxydation, d'isomérisation ou de polymérisation des composés phénoliques, réduisant ainsi leur quantité extractible et leur biodisponibilité. Ces résultats corroborent les travaux de Dai et Mumper (2010) ainsi que de Fang et Bhandari (2010), qui ont montré que les polyphénols non protégés subissent des pertes importantes lors des procédés de transformation alimentaire impliquant la chaleur.

Dans l'ensemble, les résultats démontrent clairement que la stratégie d'enrichissement influence fortement la rétention des polyphénols dans les cookies sans gluten. L'encapsulation dans des cellules de levure intactes apparaît comme l'approche la plus performante, permettant une protection efficace des composés phénoliques et une amélioration substantielle de leur conservation après cuisson. Ces observations confirment le potentiel des microcapsules à base de levures comme systèmes de vectorisation naturels pour le développement d'aliments fonctionnels enrichis en composés bioactifs, tout en soulignant l'importance de préserver l'intégrité structurale des cellules encapsulantes afin de maximiser leur effet protecteur.

2. Teneurs en flavonoïdes

2.1 L'effet de la microencapsulation sur la teneur en flavonoïdes de *Myrtus communis* L.

Afin d'évaluer l'effet de la microencapsulation sur la teneur en flavonoïdes de l'extrait de *Myrtus communis* (L.), les flavonoïdes totaux ont été quantifiés dans les différentes solutions étudiées. Les données obtenues ont été soumises à une analyse de variance (ANOVA), suivie du test de comparaison multiple de Tukey afin d'identifier les différences significatives entre les moyennes. Les résultats sont exprimés en milligrammes équivalents de quercétine par gramme d'extrait sec (mg EQ/g ES) et sont présentées graphiquement dans la **(Figure 14)**

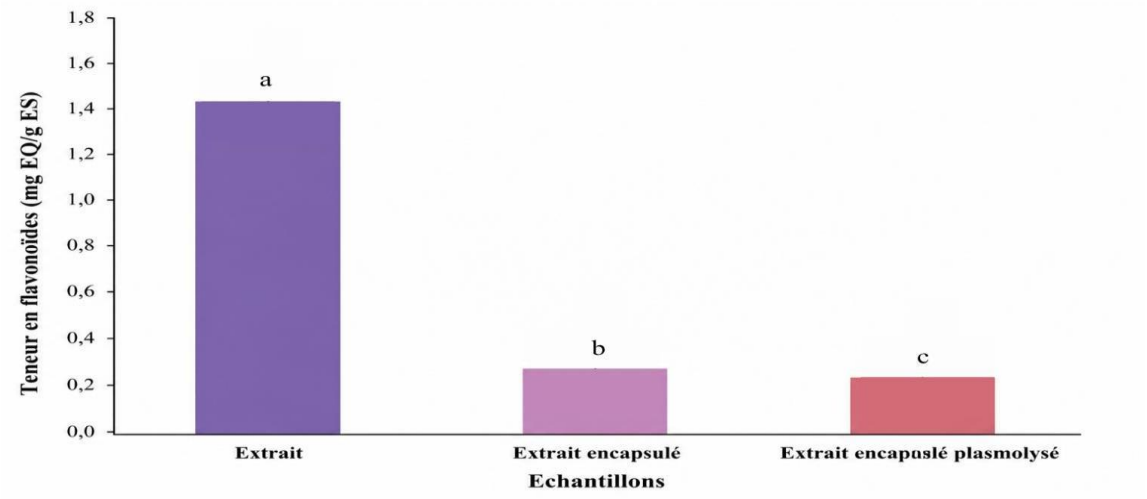


Figure 14 : Teneur totale en flavonoïdes de l'extrait de *Myrtus communis* L. avant et après microencapsulation

***Les résultats sont exprimés en mg équivalents de quercétine par gramme d'extrait sec (mg EQ/g ES). Les valeurs représentent la moyenne ± écart-type (n = 3). Les différentes lettres (a,b,c) indiquent des différences significatives (p < 0,05) selon le test de Tukey.**

Les résultats présentés dans la **(Figure 14)** montrent que la teneur en flavonoïdes totaux varie significativement selon le traitement appliqué ($p < 0,05$). L'extrait libre a présenté la teneur la plus élevée en flavonoïdes, avec une valeur moyenne de 1,431 ± 0,014 mg EQ/g ES, tandis que les extraits encapsulés ont enregistré des valeurs nettement plus faibles. L'extrait encapsulé a affiché une teneur de 0,269 ± 0,001 mg EQ/g ES, alors que l'extrait encapsulé plasmolysé a présenté la valeur la plus faible (0,242 ± 0,002 mg EQ/g ES). Ces résultats indiquent que l'encapsulation entraîne une diminution importante de la teneur apparente en flavonoïdes, et que la plasmolyse avant encapsulation accentue légèrement cette diminution.

Ces résultats sont globalement en accord avec ceux rapportés par (Semouma *et al., 2024*), qui ont étudié l'encapsulation d'extraits de fruits de *Myrtus communis* dans des cellules de *Saccharomyces cerevisiae*. Les auteurs ont montré que l'encapsulation entraîne une diminution des teneurs mesurées en polyphénols, flavonoïdes et tanins, principalement en raison de l'effet de dilution induit par la matrice d'encapsulation ainsi que des interactions entre les composés phénoliques et la paroi cellulaire. Dans la présente étude, la même tendance est observée, confirmant que l'incorporation des flavonoïdes dans une matrice biologique réduit leur disponibilité analytique.

Par ailleurs, les résultats obtenus dans ce travail sont inférieurs à ceux rapportés par (Cvitković *et al.*2025), qui ont étudié l'encapsulation d'extraits de fruits de myrte par extrusion électrostatique dans une matrice d'alginate. Ces auteurs ont obtenu des taux de rétention des composés phénoliques atteignant 61,13 %, alors que la rétention estimée dans notre étude est d'environ 18,8 %. Cette différence peut être attribuée à la structure du système d'encapsulation et au mode de formation des particules. L'alginate forme des réseaux tridimensionnels fortement réticulés qui limitent la diffusion des composés bioactifs, ce qui améliore leur rétention par rapport aux systèmes à base de cellules de levure.

De plus, (Liu *et al.,2*025) ont montré que les conditions de séchage, notamment la température lors du séchage par atomisation, influencent fortement la stabilité des flavonoïdes encapsulés, en entraînant des pertes accrues à haute température. Dans le même sens, (Zahara *et al*.,2024) ont obtenu des efficacités d'encapsulation élevées (jusqu'à 79,67 %) en utilisant un mélange de gomme arabique et de maltodextrine, soulignant l'importance du choix des matériaux de paroi dans la protection des flavonoïdes. Ces résultats suggèrent que les faibles valeurs observées dans notre étude peuvent être liées principalement aux conditions de procédé plutôt qu'au système d'encapsulation lui-même.

La teneur élevée observée dans l'extrait libre de *Myrtus communis* s'explique par la disponibilité directe des flavonoïdes pour l'extraction et le dosage. À l'inverse, la diminution observée après encapsulation ne traduit pas nécessairement une dégradation totale des composés, mais plutôt une réduction de leur extractibilité analytique. En effet, l'incorporation dans la matrice cellulaire peut limiter la libération des flavonoïdes lors de l'extraction, entraînant une sous-estimation de leur concentration réelle (Semouma *et al.,* 2024 ; Bińkowska *et al.,* 2024). De plus, l'ajout de matériaux encapsulants induit un effet de dilution qui réduit mécaniquement la concentration apparente exprimée par gramme d'extrait sec.

Enfin, la légère diminution observée entre l'extrait encapsulé et l'extrait encapsulé plasmolysé suggère que le traitement de plasmolyse a modifié les propriétés de la paroi cellulaire de la levure. Selon Hussain *et al.* (2018), les modifications structurales induites par ce type de traitement peuvent influencer les phénomènes de rétention, de diffusion et de libération des composés bioactifs. Dans notre étude, cette modification pourrait avoir entraîné une perte partielle de flavonoïdes ou une diminution de leur récupération lors du dosage analytique.

2.2 Effet de l'enrichissement en extrait sur les teneurs en flavonoïdes des cookies sans gluten

Dans le but de caractériser l'effet de l'incorporation de l'extrait de *Myrtus communis* L. sur la teneur en flavonoïdes des cookies sans gluten, les flavonoïdes totaux ont été quantifiés dans les différentes formulations étudiées. Les données obtenues ont été soumises à une analyse de la variance (ANOVA), suivie du test de comparaison multiple de Tukey afin de mettre en évidence les différences significatives entre les moyennes. Les résultats sont exprimés en milligrammes équivalents de quercétine par gramme de matière sèche (mg EQ/g MS) et sont présentés dans le **(Tableau 5)**

Tableau 5 : Teneurs en flavonoïdes (mg EQ/g ES) des cookies sans gluten enrichis par différentes formes d'extrait de *Myrtuscommunis* L. à diverses concentrations d'incorporation.

Type d'extrait	**Concentration (%)**	**Flavonoïdes totaux (mg EQ g^{-1} ES)**
Témoin	–	$1,194 \pm 0,005^{a}$
Extrait encapsulé dans des cellules de levure plasmolysées	0,02	$0,360 \pm 0,009^{d}$
	0,03	$1,002 \pm 0,026^{b}$
	0,05	$0,680 \pm 0,004^{c}$
Extrait encapsulé dans des cellules de levure intactes	0,02	$0,234 \pm 0,011^{f}$
	0,03	$0,278 \pm 0,002^{e}$
	0,05	$0,200 \pm 0,005^{g}$
Extrait libre	0,02	$0,264 \pm 0,002^{e}$
	0,03	$0,274 \pm 0,006^{e}$
	0,05	$0,195 \pm 0,001^{g}$

Les données sont exprimées en moyenne ± écart-type (n = 3). Les lettres en exposant (a,b,c,d, e,f ,g) indiquent les groupes statistiques obtenus par le test de Tukey ($p < 0,05$).

Les résultats obtenus montrent que la teneur en flavonoïdes des cookies sans gluten est significativement influencée par la forme de l'extrait incorporé ainsi que par son taux d'incorporation. Le cookie témoin présente la teneur la plus élevée en flavonoïdes (1,194 ± 0,005 mg EQ/g ES), valeur significativement supérieure à celles de toutes les formulations enrichies, comme l'attestent les groupes statistiques distincts attribués par le test de Tukey ($p < 0,05$). Cette observation suggère que les flavonoïdes naturellement présents dans les

matières premières de la formulation sont mieux préservés ou plus facilement extractibles que ceux apportés sous forme d'extraits enrichissants.

Parmi les formulations enrichies, les cookies contenant l'extrait encapsulé dans des cellules de levure plasmolysées ont présenté les teneurs les plus élevées. La concentration de 0,03 % a conduit à la valeur maximale (1,002 ± 0,026 mg EQ/g ES), suivie de la concentration de 0,05 % (0,680 ± 0,004 mg EQ/g ES), tandis que la concentration de 0,02 % a enregistré la valeur la plus faible (0,360 ± 0,009 mg EQ/g ES). Les différences statistiques observées entre ces trois concentrations démontrent que l'efficacité de l'encapsulation plasmolysée dépend fortement du niveau d'incorporation. À l'inverse, les extraits encapsulés dans des cellules intactes et les extraits libres ont conduit à des teneurs beaucoup plus faibles, variant respectivement entre 0,200 ± 0,005 et 0,278 ± 0,002 mg EQ/g ES, et entre 0,195 ± 0,001 et 0,274 ± 0,006 mg EQ/g ES. Ces résultats indiquent que la plasmolyse a favorisé une meilleure préservation ou une meilleure disponibilité analytique des flavonoïdes, particulièrement à la concentration intermédiaire de 0,03 %.

Les résultats obtenus sont en accord avec ceux de (Semouma *et al.*,2024), qui ont rapporté une diminution des teneurs en polyphénols, flavonoïdes et tanins après encapsulation d'extraits de *Myrtus communis* L. dans des cellules de *Saccharomyces cerevisiae*. De même, dans la présente étude, toutes les formulations enrichies ont présenté des teneurs en flavonoïdes inférieures à celle du témoin. Les auteurs ont également montré que les cellules plasmolysées favorisent une meilleure incorporation et protection des composés phénoliques que les cellules intactes, observation corroborée par nos résultats puisque l'extrait encapsulé plasmolysé à 0,03 % a présenté la teneur en flavonoïdes la plus élevée parmi les formulations enrichies. Ces résultats soulignent l'intérêt de la plasmolyse pour améliorer la rétention des composés bioactifs et limiter leur dégradation lors des procédés de transformation alimentaire.Le comportement non linéaire observé pour les cellules plasmolysées peut résulter d'un équilibre complexe entre la quantité d'extrait incorporée, l'efficacité de l'encapsulation et la disponibilité finale des composés dans la matrice biscuitière (Grgić *et al.,* 2020 ; Oliveira *et al.,* 2020). À 0,03 %, la quantité d'extrait incorporée semble correspondre à une concentration optimale permettant de maximiser la protection et la disponibilité des flavonoïdes. En revanche, à 0,05 %, une surcharge de la matrice encapsulante pourrait favoriser des phénomènes d'agrégation, limiter les transferts de masse ou accroître les

interactions entre les flavonoïdes et les constituants de la matrice alimentaire, réduisant ainsi leur extractibilité (Romero-González *et al.,* 2019 ; Chongsrimsirisakhol et Pirak, 2023).

Les faibles teneurs observées dans les formulations contenant l'extrait libre peuvent être attribuées à la forte sensibilité des flavonoïdes aux conditions de transformation alimentaire. En l'absence de protection physique, ces composés sont davantage exposés aux effets combinés de la chaleur, de l'oxygène et des réactions chimiques intervenant durant la cuisson, ce qui entraîne une diminution de leur concentration mesurable (Kalinová *et al.,* 2024 ; Ospina *et al.,* 2023). De plus, les flavonoïdes peuvent former des complexes avec les protéines, les polysaccharides et les fibres alimentaires présents dans la matrice du cookie, réduisant leur disponibilité analytique (Chernenko, 2025).

Les formulations contenant l'extrait encapsulé dans des cellules intactes présentent également des teneurs faibles et proches de celles observées pour l'extrait libre. Cette situation pourrait s'expliquer par une rétention excessive des flavonoïdes au sein de la structure cellulaire, limitant leur libération lors de l'extraction analytique. Selon Martinović *et al.* (2023) et Gonçalves *et al.* (2021), une structure encapsulante trop compacte peut réduire l'accessibilité des composés bioactifs malgré leur protection contre les facteurs environnementaux. À l'inverse, les cellules plasmolysées possèdent une structure plus poreuse susceptible de faciliter la libération des flavonoïdes tout en conservant une protection suffisante contre les contraintes thermiques.

Les travaux de Zahara *et al.* (2024) et de Remígio *et al.* (2024) confirment également que la nature de la matrice d'encapsulation constitue un facteur déterminant dans la préservation des flavonoïdes. Ces auteurs ont montré que l'optimisation de la formulation encapsulante permet d'améliorer significativement l'efficacité d'encapsulation, la stabilité thermique et la rétention des composés bioactifs. Ces observations suggèrent que des améliorations supplémentaires pourraient être obtenues en optimisant davantage les conditions d'encapsulation appliquées dans la présente étude.

3. Activité antioxydante

3.1 Effet de la microencapsulation sur l'activité antioxydante des extraits de *Myrtus communis* L.

Afin d'évaluer l'effet de la microencapsulation sur le potentiel antioxydant de l'extrait de *Myrtus communis* L., l'activité antioxydante des différentes extraits a été déterminée par la méthode du DPPH.Les données ont été analysées statistiquement à l'aide d'une ANOVA suivie du test Tucky. Les résultats obtenus sont présentés dans **(figure 15)**.

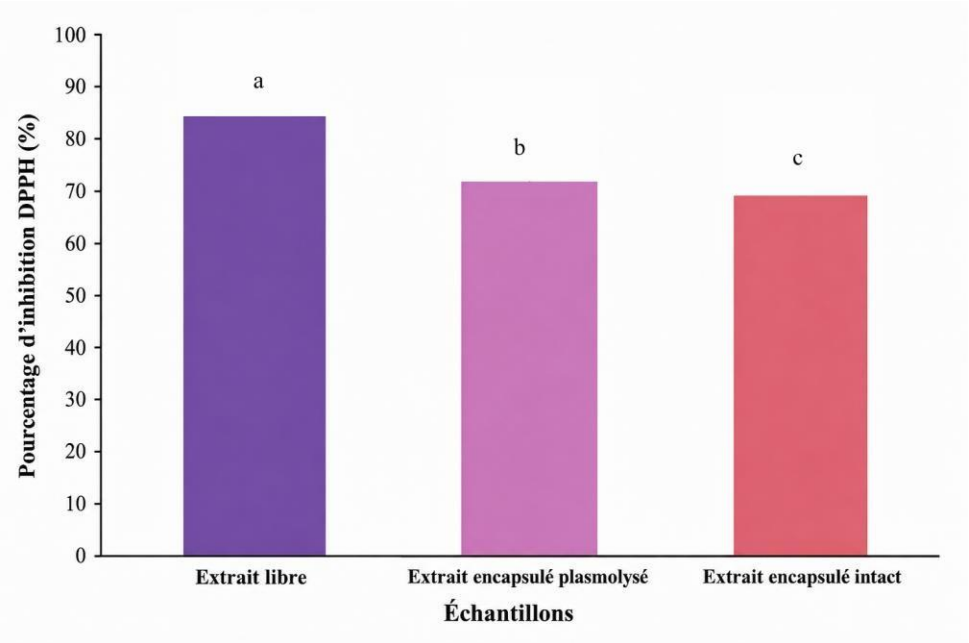


Figure 15 : Activité antioxydante (%) d'inhibition du DPPH d'extraits de *Myrtus communis* L. libre, encapsulé dans des cellules intactes et encapsulé dans des cellules plasmolysées

L'analyse statistique (ANOVA) des pourcentages d'inhibition du radical DPPH a mis en évidence des différences significatives entre les trois échantillons ($p < 0,05$). L'extrait libre a présenté l'activité antioxydante la plus élevée (84,85 ± 0,09 %), suivi de l'extrait encapsulé plasmolysé (73,05 ± 0,17 %), tandis que l'extrait encapsulé intact a enregistré la valeur la plus faible (69,55 ± 0,13 %). Ces résultats indiquent que l'encapsulation réduit l'activité antioxydante mesurée, mais que la plasmolyse permet une meilleure conservation de cette activité par rapport aux cellules intactes.

Ces observations sont cohérentes avec les travaux de (Tuberoso *et al.*,2010), qui ont attribué la forte activité antioxydante de *Myrtus communis* à sa richesse en polyphénols, flavonoïdes et anthocyanes. La valeur élevée observée pour l'extrait libre s'explique par la

disponibilité immédiate des composés bioactifs, leur permettant d'interagir directement avec le radical DPPH (Tuberoso *et al.*, 2010 ; Bugarin *et al.*, 2024). En revanche, la diminution observée après encapsulation est conforme aux observations de Mahdavi *et al.* (2016), Semouma *et al.* (2024) et Gorjian *et al.* (2022), qui ont montré que la matrice encapsulante agit comme une barrière limitant temporairement la diffusion des composés phénoliques vers le milieu réactionnel, sans pour autant entraîner leur dégradation.

La meilleure activité antioxydante mesurée dans l'extrait encapsulé plasmolysé par rapport à l'extrait encapsulé intact pourrait être attribuée à la désorganisation partielle des structures cellulaires induite par la plasmolyse, favorisant la libération des composés phénoliques tout en maintenant leur protection contre les facteurs de dégradation (Armendáriz-Barragán et al., 2016 ; Nunes et al., 2017 ; El Hammadi et al., 2024). Cette interprétation est également en accord avec Semouma et al. (2024), qui ont rapporté une meilleure accessibilité des composés bioactifs dans les systèmes encapsulés plasmolysés. Ainsi, la plasmolyse apparaît comme une stratégie prometteuse pour améliorer la biodisponibilité des antioxydants tout en préservant leur stabilité face aux contraintes environnementales telles que la température, l'oxydation et la lumière (Semouma et al., 2024 ; Laib et al., 2026).

3.2 Effet de la microencapsulation sur l'activité antioxydante des cookies sans gluten enrichis en extrait de Myrtus communis L.

L'activité antioxydante des cookies sans gluten enrichis en extrait de *Myrtus communis* L.a été évaluée afin d'étudier l'effet du mode d'incorporation de l'extrait (libre, encapsulé dans des cellules intactes ou plasmolysées) ainsi que du taux d'incorporation sur le potentiel antioxydant du produit final après cuisson. Les résultats obtenus sont présentés dans **(Tableau 6)**

Tableau 6 : Effet du mode d'encapsulation et du taux d'incorporation de l'extrait de *Myrtuscommunis* sur l'activité antioxydante (% d'inhibition du DPPH) des cookies sans gluten.

Type d'extrait	**Concentration (%)**	**Inhibition du radical DPPH (%)**
Témoin	–	$88,79 \pm 0,04^{b}$
Extrait libre	0,02	$88,54 \pm 0,11^{bc}$

	0,03	89,44 ± 0,02[a]
	0,05	86,87 ± 0,15[d]
Extrait encapsulé dans des cellules de levure intactes	0,02	86,17 ± 0,29[e]
	0,03	88,14 ± 0,08[c]
	0,05	87,76 ± 0,07[c]
Extrait encapsulé dans des cellules de levure plasmolysées	0,02	89,58 ± 0,09[a]
	0,03	88,79 ± 0,25[b]
	0,05	88,93 ± 0,05[b]

***Pourcentage d'inhibition du radical DPPH exprimé en % (moyenne ± écart-type, n = 3). Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les traitements selon le test de Tukey (p < 0,05).**

Les résultats du test DPPH ont révélé des différences significatives entre les formulations étudiées ($p < 0,05$). Le témoin a présenté une activité antioxydante de 88,79 ± 0,04 %. Parmi les formulations enrichies avec l'extrait libre, la concentration de 0,03 % a enregistré l'activité antioxydante la plus élevée (89,44 ± 0,02 %), significativement supérieure aux autres traitements, tandis que la concentration de 0,05 % a présenté la valeur la plus faible (86,87 ± 0,15 %). Les formulations contenant l'extrait encapsulé intact ont affiché des pourcentages d'inhibition compris entre 86,17 ± 0,29 % et 88,14 ± 0,08 %, alors que les formulations enrichies avec l'extrait encapsulé plasmolysé ont montré les valeurs les plus élevées parmi les systèmes encapsulés, variant entre 88,79 ± 0,25 % et 89,58 ± 0,09 %, avec un maximum mesuré à 0,02 %.

Ces résultats concordent avec les travaux de Tuberoso *et al.* (2010), qui ont démontré la forte activité antioxydante de *Myrtus communis* en raison de sa richesse en polyphénols, flavonoïdes, anthocyanes et autres métabolites bioactifs capables de neutraliser efficacement les radicaux libres. L'activité élevée enregistrée dans les formulations enrichies peut ainsi être attribuée à la présence de ces composés, dont les groupements hydroxyles sont capables de céder des électrons ou des atomes d'hydrogène au radical DPPH (Snoussi *et al.,* 2021 ; Medda *et al.,* 2021 ; Al-Maharik *et al.,* 2023).

La supériorité de l'extrait libre à 0,03 % suggère l'existence d'une concentration optimale permettant d'obtenir une activité antioxydante maximale. À cette concentration, les composés bioactifs seraient suffisamment abondants pour exercer leur effet antioxydant sans être affectés par des phénomènes d'interaction ou de complexation avec les constituants de la matrice alimentaire. En revanche, la légère diminution observée à 0,05 % pourrait résulter

d'interactions polyphénols–protéines ou polyphénols–amidon, de phénomènes de saturation ou encore d'une dégradation partielle des composés phénoliques lors de la cuisson (Armendáriz-Barragán *et al.,* 2016 ; Snoussi *et al.,* 2022 ; Semouma *et al.,* 2024 ; Abdessemed *et al.,* 2024). Des observations similaires ont été rapportées dans les produits de boulangerie enrichis en extraits végétaux, où des concentrations modérées d'incorporation conduisent souvent à une activité antioxydante supérieure à celle obtenue avec des doses plus élevées (Pasqualone *et al.,* 2014).

Les valeurs légèrement inférieures observées pour les formulations contenant l'extrait encapsulé intact peuvent être attribuées à l'effet barrière de la matrice encapsulante. Celle-ci limite temporairement la diffusion des composés phénoliques vers le milieu réactionnel du DPPH, réduisant ainsi leur accessibilité immédiate sans nécessairement provoquer leur dégradation (Mahdavi *et al.,* 2016 ; Mehta *et al.,* 2022). Cet effet protecteur demeure néanmoins avantageux sur le plan technologique puisqu'il contribue à préserver les composés bioactifs vis-à-vis des effets de la chaleur, de l'oxygène et de la lumière durant la transformation et le stockage (Hosseini et Jafari, 2020 ; Rezagholizade-Shirvan *et al.,* 2024 ; Pateiro *et al.,* 2021).

Les performances antioxydantes plus élevées observées dans les formulations encapsulées plasmolysées par rapport aux formulations encapsulées intactes pourraient être liées aux modifications structurelles induites par la plasmolyse. La désorganisation partielle des membranes cellulaires favorise la libération et la disponibilité des composés phénoliques tout en conservant les avantages protecteurs de l'encapsulation. Cette interprétation est cohérente avec les observations rapportées par Semouma *et al.* (2024), Nunes *et al.* (2017), Coradello *et al.* (2024), Kalinina *et al.* (2024) et Chacón-Figueroa *et al.* (2025), qui ont montré que l'augmentation de la perméabilité cellulaire améliore l'accessibilité des composés bioactifs et leur activité antioxydante.

Par ailleurs, les valeurs relativement proches de celles du témoin suggèrent également une contribution du potentiel antioxydant intrinsèque des ingrédients de base de la formulation, notamment le sucre de datte, la farine d'amande, les œufs et la vanille, qui renferment naturellement des composés phénoliques et d'autres molécules antioxydantes (Shyamala *et al.,* 2007 ; Tai *et al.,* 2011 ; Liu *et al.,* 2014 ; Sampath *et al.,* 2019 ; Baliyan *et al.,* 2022 ; De Oliveira *et al.,* 2024). Cette contribution a également été rapportée dans d'autres produits céréaliers enrichis en ingrédients naturels (Abd El-Malik *et al.,* 2025).

Dans l'ensemble, les résultats démontrent que l'activité antioxydante des cookies sans gluten dépend à la fois de la concentration de l'extrait incorporé et de la stratégie d'encapsulation utilisée. Les formulations encapsulées plasmolysées apparaissent comme les plus performantes parmi les systèmes encapsulés, tandis que l'incorporation de l'extrait libre à une concentration optimale de 0,03 % permet d'obtenir l'activité antioxydante la plus élevée.

4. Effet des différentes modalités d'enrichissement par l'extrait de *Myrtus communis* sur les paramètres physicochimiques des cookies sans gluten

Les propriétés physicochimiques constituent des indicateurs essentiels de la qualité et de la stabilité des produits de boulangerie. Afin d'évaluer l'impact de l'incorporation de l'extrait de *Myrtuscommunis* sous forme libre ou encapsulée sur les caractéristiques des cookies sans gluten, plusieurs paramètres ont été déterminés, notamment l'humidité, l'activité de l'eau, le pH et la teneur en cendres. Les résultats obtenus pour les différentes formulations sont présentés dans **(Tableau 7)**

Tableau 7 : Impact des différentes formes d'incorporation de l'extrait de *Myrtuscommunis* (libre, encapsulé dans des cellules intactes et encapsulé dans des cellules plasmolysées) sur les propriétés physicochimiques des cookies sans gluten

Type d'extrait	Concentration (%)	Humidité (%)	Activité de l'eau (aw)	pH	Cendres (% MS)
Témoin	–	$6,82 \pm 0,04^{a}$	$0,412 \pm 0,003^{a}$	$6,54 \pm 0,02^{a}$	$1,42 \pm 0,03^{c}$
Extrait libre	0,02	$7,10 \pm 0,03^{a}$	$0,425 \pm 0,002^{a}$	$6,49 \pm 0,01^{a}$	$1,55 \pm 0,02^{bc}$
	0,03	$7,28 \pm 0,02^{ab}$	$0,437 \pm 0,002^{b}$	$6,45 \pm 0,01^{a}$	$1,68 \pm 0,02^{b}$
	0,05	$7,54 \pm 0,03^{b}$	$0,451 \pm 0,003^{c}$	$6,38 \pm 0,02^{b}$	$1,84 \pm 0,03^{a}$
Extrait encapsulé dans des cellules de levure intactes	0,02	$6,95 \pm 0,02^{a}$	$0,421 \pm 0,002^{a}$	$6,51 \pm 0,01^{a}$	$1,60 \pm 0,02^{b}$
	0,03	$7,12 \pm 0,03^{a}$	$0,434 \pm 0,002^{b}$	$6,46 \pm 0,01^{a}$	$1,76 \pm 0,02^{ab}$
	0,05	$7,36 \pm 0,02^{b}$	$0,446 \pm 0,003^{c}$	$6,40 \pm 0,01^{b}$	$1,92 \pm 0,02^{a}$
Extrait encapsulé dans des cellules de levure plasmolysées	0,02	$7,02 \pm 0,03^{a}$	$0,423 \pm 0,003^{a}$	$6,50 \pm 0,02^{a}$	$1,66 \pm 0,03^{b}$
	0,03	$7,25 \pm 0,02^{ab}$	$0,439 \pm 0,002^{b}$	$6,44 \pm 0,01^{a}$	$1,82 \pm 0,02^{a}$
	0,05	$7,48 \pm 0,03^{b}$	$0,452 \pm 0,002^{c}$	$6,36 \pm 0,02^{b}$	$1,98 \pm 0,03^{a}$

**Les données sont exprimées en moyenne ± écart-type (n = 3). Les lettres en exposant (a,b,c) indiquent les groupes statistiques obtenus par le test de Tukey (p < 0,05). MS : matière sèche ; aw : activité de l'eau.*

4.1 Humidité (%)

L'analyse statistique (ANOVA) des teneurs en humidité des cookies sans gluten enrichis avec *Myrtus communis* L. révèle des différences significatives entre les formulations ($p < 0,05$). Le témoin présente la plus faible humidité (6,82 ± 0,04 %). Une augmentation progressive est observée avec la concentration en extrait pour les trois formes d'incorporation. Les valeurs maximales sont obtenues avec l'extrait libre (7,54 ± 0,03 % à 0,05 %), suivies des formulations plasmolysées (7,48 ± 0,03 %) puis des formulations encapsulées intactes (7,36 ± 0,02 %).

Cette augmentation peut être attribuée à la présence de composés phénoliques et de flavonoïdes de *Myrtus communis*, riches en groupements hydroxyles capables de retenir l'eau par liaisons hydrogène (Huo *et al.,* 2024 ; Ebrahimi *et al.,* 2025). Elle est également liée à la structure des formulations sans gluten, où l'absence de réseau glutineux et la présence d'hydrocolloïdes comme la gomme xanthane favorisent la rétention d'eau (Mir *et al.,* 2016 ; Belorio et Gómez, 2020 ; Culeţu *et al.,* 2021 ; Tahmouzi *et al.,* 2025).

À concentration égale, l'extrait libre présente les humidités les plus élevées, suivi des systèmes plasmolysés puis des encapsulations intactes. Cette tendance s'explique par la disponibilité directe des composés hydrophiles dans l'extrait libre, tandis que la matrice encapsulante modifie la rétention et la libération de l'eau. Les cellules plasmolysées montrent une légère amélioration par rapport aux cellules intactes, probablement en raison de l'augmentation de la porosité cellulaire et de la perméabilité membranaire, facilitant les interactions eau–matrice (Kalinina *et al.,* 2024 ; Coradello *et al.,* 2024 ; Chacón-Figueroa et *al.,* 2025 ; Laib *et al.,* 2026).

4.2 Activités de l'eau (aw)

L'activité de l'eau (aw) a augmenté significativement dans toutes les formulations enrichies par rapport au témoin (0,412 ± 0,003), avec une évolution dépendante de la concentration en extrait de *Myrtus communis*. Les valeurs les plus élevées ont été observées à 0,05 %, atteignant 0,451 ± 0,003 pour l'extrait libre, 0,446 ± 0,003 pour l'extrait encapsulé intact et 0,452 ± 0,002 pour l'extrait encapsulé plasmolysé. À concentration égale, les formulations plasmolysées et libres ont généralement présenté des valeurs supérieures à celles des formulations encapsulées intactes.

Cette augmentation est probablement liée à la présence de composés phénoliques, d'acides organiques et de fibres, capables de retenir l'eau et de modifier sa répartition dans la matrice alimentaire (Rai *et al.,* 2014 ; Uysal *et al.,* 2023 ; Breschi *et al.,* 2024 ; De Rossi *et al.,* 2025). Elle suit la même tendance que celle observée pour l'humidité, traduisant une relation étroite entre la quantité d'eau retenue et sa disponibilité dans le produit (Tapia et al., 2020). L'encapsulation pourrait également contribuer à la rétention d'eau grâce à son effet protecteur et à la libération progressive des composés bioactifs (El Hammadi *et al.,* 2024 ; Xu *et al.,* 2024 ; Chernenko, 2025).

Les valeurs légèrement plus élevées observées pour les formulations plasmolysées pourraient être attribuées à l'augmentation de la perméabilité cellulaire induite par la plasmolyse, facilitant les interactions entre l'eau et les composés encapsulés (Zafirova *et al.,* 2026). Toutefois, toutes les valeurs mesurées (de 0,421 à 0,452) restent largement inférieures au seuil critique de 0,60, garantissant une bonne stabilité microbiologique des cookies enrichis (Tapia *et al.,* 2020 ; Yenrina *et al.,* 2022).

4.3 pH

Les résultats montrent une légère diminution du pH après incorporation de l'extrait de *Myrtus communis*, particulièrement à la concentration de 0,05 %, pour laquelle les formulations plasmolysées ont présenté la valeur la plus faible (6,36 ± 0,02). Cette tendance est cohérente avec la composition biochimique des baies de myrte, naturellement riches en acides organiques, notamment les acides citrique et malique, ainsi qu'en composés phénoliques susceptibles de contribuer à l'acidification de la matrice alimentaire (Hacıseferoğulları *et al.,* 2012 ; Sumbul *et al.,* 2012).

La diminution plus marquée observée dans les formulations plasmolysées pourrait s'expliquer par l'altération partielle des structures cellulaires induite par la plasmolyse, favorisant la libération des composés intracellulaires acidifiants et augmentant leur disponibilité dans le produit (Serio *et al.,* 2014 ; Moura *et al.,* 2023). Toutefois, l'amplitude des variations reste faible, indiquant que l'ajout d'extrait de myrte ne modifie pas profondément l'équilibre acidobasique des cookies. Cette légère acidification pourrait néanmoins contribuer à améliorer la stabilité microbiologique du produit et à limiter certaines réactions de dégradation au cours du stockage (Polat Yemiş *et al.,* 2022 ; Keceli & Simsek Mertoglu, 2024).

4.4 Cendres (% MS)

Une augmentation significative de la teneur en cendres ayant été enregistrées dans les formulations enrichies par rapport au témoin, les valeurs les plus élevées étant enregistrées pour les formulations plasmolysées à 0,05 %. Cette augmentation traduit un enrichissement minéral des cookies, attribuable à la richesse naturelle des fruits de *Myrtus communis* L . en potassium, calcium, phosphore, magnésium et sodium (Hacıseferoğulları *et al.,* 2012 ; Sumbul *et al.,* 2012 ; Özcan & Simsek, 2017).

Les teneurs plus élevées observées dans les formulations plasmolysées pourraient être liées à l'altération partielle des membranes cellulaires induite par la plasmolyse, favorisant la libération des minéraux intracellulaires et leur incorporation dans la matrice alimentaire. Des résultats similaires ont été rapportés pour des produits céréaliers enrichis avec des ingrédients végétaux riches en minéraux, où l'augmentation des cendres est directement associée à l'apport de composés minéraux d'origine végétale (Machado *et al.,* 2021 ; Hussain *et al.,* 2025 ; Levickienė *et al.,* 2024 ; Tarannum *et al.,* 2025). Ces observations confirment l'intérêt de l'extrait de myrte comme ingrédient fonctionnel permettant d'améliorer la valeur nutritionnelle des produits de boulangerie sans gluten.

5. Effet des différentes modalités d'enrichissement sur les propriétés nutritionnelles des cookies sans gluten

L'analyse de la composition nutritionnelle permet d'évaluer l'effet de l'enrichissement des cookies sans gluten par l'extrait de *Myrtus communis* sur leur valeur nutritive. Les teneurs en protéines, lipides, glucides ainsi que la valeur énergétique ont été déterminées pour l'ensemble des formulations étudiées. Les résultats obtenus sont présentés dans **(tableau 8).**

Tableau 8 : Impact des différentes formes d'incorporation de l'extrait de *Myrtus communis* (libre, encapsulé dans des cellules intactes et encapsulé dans des cellules plasmolysées) sur la composition nutritionnelle des cookies sans gluten.

Type d'extrait	Concentration (%)	Protéines (g/100 g)	Lipides (g/100 g)	Glucides (g/100 g)	Valeur énergétique (kcal/100 g)
Témoin	–	$7,82 \pm 0,05^{b}$	$24,62 \pm 0,08^{a}$	$58,84 \pm 0,12^{c}$	$487,32 \pm 0,42^{a}$
Extrait libre	0,02	$8,04 \pm 0,03^{b}$	$23,40 \pm 0,05^{b}$	$60,02 \pm 0,10^{bc}$	$479,84 \pm 0,36^{b}$
	0,03	$8,22 \pm 0,04^{ab}$	$22,65 \pm 0,04^{bc}$	$61,15 \pm 0,08^{b}$	$474,60 \pm 0,31^{bc}$
	0,05	$8,46 \pm 0,03^{a}$	$21,84 \pm 0,06^{c}$	$62,40 \pm 0,11^{a}$	$468,52 \pm 0,40^{c}$

Extrait encapsulé dans des cellules de levure intactes	0,02	7,95 ± 0,03^{b}	23,12 ± 0,04^{b}	60,34 ± 0,09^{b}	476,90 ± 0,34^{b}
	0,03	8,12 ± 0,04^{b}	22,30 ± 0,05^{bc}	61,62 ± 0,10^{b}	471,22 ± 0,38^{bc}
	0,05	8,31 ± 0,03^{ab}	21,42 ± 0,05^{c}	62,88 ± 0,09^{a}	465,84 ± 0,35^{c}
Extrait encapsulé dans des cellules de levure plasmolysées	0,02	8,10 ± 0,04^{b}	22,94 ± 0,05^{b}	60,58 ± 0,10^{b}	475,42 ± 0,37^{b}
	0,03	8,34 ± 0,03^{ab}	22,06 ± 0,04^{c}	61,90 ±0,11^{ab}	469,76 ± 0,32^{c}
	0,05	8,58 ± 0,02^{a}	21,18 ± 0,05^{c}	63,16 ± 0,10^{a}	463,90 ± 0,41^{c}

***Les données sont exprimées en moyenne ± écart-type. Les différences significatives entre formulations sont indiquées par des lettres distinctes (p < 0,05)**

5.1 Protéines

La teneur en protéines des cookies sans gluten a augmenté significativement après enrichissement, passant de 7,82 ± 0,05 g/100 g pour le témoin à 8,58 ± 0,02 g/100 g pour la formulation contenant des cellules plasmolysées à 0,05 % ($p < 0,05$). Une relation dose-réponse a été observée pour les trois modalités d'enrichissement, les teneurs protéiques augmentant avec la concentration en extrait. À concentration égale, les valeurs suivent l'ordre : cellules intactes < extrait libre < cellules plasmolysées.

Cette augmentation s'explique par la contribution conjointe de la matrice de base, riche en protéines grâce à la farine d'amande et aux œufs (Benallouache et Aberkane, 2021), de l'extrait de myrte contenant une fraction protéique soluble (Santos, 2011 ; Bou Attia *et al.*, 2014) et des cellules de levure utilisées pour l'encapsulation, reconnues pour leur richesse en protéines intracellulaires et en mannoprotéines pariétales (Wang *et al.*, 2018 ; Wang *et al.*, 2024).

Les teneurs plus élevées observées dans les formulations plasmolysées peuvent être attribuées à l'altération de la membrane cellulaire induite par la plasmolyse, favorisant la libération des protéines intracellulaires vers la matrice alimentaire (Pham Hoang *et al.*, 2016 ; Paramithiotis, 2022). Les formulations contenant l'extrait libre présentent des valeurs intermédiaires, probablement en raison de la co-extraction de fractions protéiques solubles avec les composés phénoliques lors de l'extraction hydroalcoolique (Le Bourvellec et Renard, 2012).

Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par Machado *et al.* (2021), qui ont observé une augmentation de la teneur en protéines dans des cookies sans gluten enrichis en biomasse levurienne, ainsi qu'avec les travaux de Yildiz *et al.* (2021) et Bourekoua *et al.*

(2023), qui ont également montré que l'incorporation d'ingrédients riches en protéines améliore significativement le profil nutritionnel des produits sans gluten.

5.2 Lipides

La teneur en lipides des cookies sans gluten a diminué significativement après enrichissement, passant de 24,62 ± 0,08 g/100 g pour le témoin à 21,18 ± 0,05 g/100 g pour la formulation contenant des cellules plasmolysées à 0,05 % ($p < 0,05$). Une diminution dose-dépendante a été observée pour les trois modalités d'enrichissement, les formulations plasmolysées présentant systématiquement les valeurs les plus faibles.

Cette réduction ne peut être expliquée par un simple effet de dilution compte tenu des faibles quantités d'extrait incorporées. Elle serait plutôt liée aux interactions entre les polyphénols du myrte et les acides gras de la matrice alimentaire, principalement apportés par l'huile de coco et la farine d'amande (Yildiz *et al.,* 2021). Les polyphénols sont en effet capables de former des complexes non covalents avec les lipides par l'intermédiaire de liaisons hydrogène et d'interactions hydrophobes, réduisant ainsi la fraction lipidique extractible et quantifiable (Nelson, 2002 ; Le Bourvellec & Renard, 2012 ; Bourekoua *et al.*, 2018).

L'effet plus marqué observé dans les formulations plasmolysées pourrait s'expliquer par la plus grande perméabilité des cellules de levure après plasmolyse, favorisant la libération des composés phénoliques et augmentant leur interaction avec les lipides de la matrice (Paramithiotis, 2022 ; Kalinina *et al.,* 2024). À l'inverse, les cellules intactes retiennent partiellement ces composés, tandis que l'extrait libre demeure plus sensible aux dégradations thermiques durant la cuisson (Pham-Hoang *et al.,* 2016 ; Snoussi *et al.,* 2022).

Des résultats similaires ont été rapportés dans des produits de boulangerie enrichis en composés phénoliques, où une diminution de la teneur en lipides et de la valeur énergétique a été observée après incorporation d'ingrédients végétaux riches en polyphénols (Giosuè *et al.,* 2024 ; Bourekoua *et al.,* 2018). Cette réduction constitue un avantage nutritionnel, contribuant à l'élaboration de cookies sans gluten à plus faible densité énergétique (Chernenko, 2025).

5.3 Glucides

La teneur en glucides des cookies sans gluten a augmenté significativement après enrichissement, passant de 58,84 ± 0,12 g/100 g pour le témoin à 63,16 ± 0,10 g/100 g pour

les formulations contenant des cellules plasmolysées à 0,05 % ($p < 0,05$). Une augmentation dose-dépendante a été observée pour les trois modalités d'enrichissement, les cellules plasmolysées présentant systématiquement les valeurs les plus élevées.

Cette augmentation s'explique principalement par l'apport de sucres naturels et de fibres alimentaires provenant de l'extrait de *Myrtus communis* L. (Bou Attia *et al.*, 2014), ainsi que par la présence de polysaccharides structuraux des parois de *Saccharomyces cerevisiae*, notamment les β-glucanes et les mannoprotéines (Yiannikouris *et al.*, 2004 ; Wang *et al.*, 2018). Ces composés contribuent directement à la fraction glucidique totale et sont reconnus pour leurs propriétés fonctionnelles dans les produits sans gluten (Culețu *et al.*, 2021).

Les teneurs les plus élevées observées dans les formulations plasmolysées peuvent être attribuées à l'augmentation de la perméabilité cellulaire induite par la plasmolyse, favorisant la libération des polysaccharides intracellulaires et pariétaux dans la matrice alimentaire (Paramithiotis, 2022 ; Kalinina *et al.*, 2024). Par ailleurs, la diminution concomitante de la teneur en lipides contribue mécaniquement à augmenter la proportion relative des glucides dans le produit final.

Ces résultats sont cohérents avec les travaux montrant que l'enrichissement de produits de boulangerie par des matrices végétales ou levuriennes modifie significativement leur composition glucidique, en particulier leur teneur en fibres et polysaccharides fonctionnels (Yildiz *et al.*, 2021 ; Koh *et al.*, 2023). Ainsi, l'augmentation observée semble davantage liée à un enrichissement en glucides complexes qu'en sucres simples, ce qui constitue un avantage nutritionnel pour le développement de produits sans gluten fonctionnels (Krupa-Kozak *et al.*, 2022 ; Chernenko, 2025).

5.4 Valeur énergétique

La valeur énergétique des cookies sans gluten a diminué significativement après enrichissement, passant de 487,32 ± 0,42 kcal/100 g pour le témoin à 463,90 ± 0,41 kcal/100 g pour la formulation contenant des cellules plasmolysées à 0,05 % ($p < 0,05$). Une diminution dose-dépendante a été observée pour les trois modalités d'enrichissement. À concentration égale, les formulations plasmolysées ont présenté les valeurs énergétiques les plus faibles, suivies des cellules intactes puis de l'extrait libre.

Cette réduction est principalement liée à la baisse de la teneur en lipides observée dans les formulations enrichies. Étant donné que les lipides fournissent 9 kcal/g contre 4 kcal/g pour les protéines et les glucides, leur diminution exerce un effet plus marqué sur la densité

énergétique globale du produit (Baliyan *et al.,* 2022). Les formulations plasmolysées ont montré la réduction énergétique la plus importante, probablement en raison d'une plus grande libération des composés phénoliques favorisée par la plasmolyse, ce qui pourrait renforcer les interactions polyphénols–lipides et modifier leur extractibilité ou leur disponibilité dans la matrice alimentaire (Le Bourvellec et Renard, 2012 ; Bourekoua *et al.,* 2018 ; Paramithiotis, 2022 ; Kalinina *et al.*, 2024).

Nos résultats sont en accord avec ceux de Koh *et al.* (2023), qui ont rapporté une diminution de la valeur énergétique dans des cookies enrichis en poudre de feuilles de thé usagées, ainsi qu'avec les observations de Giosuè *et al.* (2024) sur des biscuits incorporant du marc de raisin riche en polyphénols. La réduction énergétique obtenue dans la présente étude atteint environ 4,8 % pour la formulation à base de cellules plasmolysées à 0,05 %, confirmant l'intérêt de cette stratégie d'enrichissement.

Globalement, l'incorporation de l'extrait de *Myrtus communis* a amélioré le profil nutritionnel des cookies sans gluten en augmentant les teneurs en protéines et en glucides complexes, notamment les β-glucanes issus des levures, tout en réduisant les lipides et la valeur énergétique. La formulation contenant des cellules plasmolysées à 0,05 % apparaît comme la plus performante, soulignant le potentiel de cette approche pour le développement de produits de boulangerie fonctionnels à valeur nutritionnelle améliorée (Chernenko, 2025 ; Rezagholizade-Shirvan *et al.*, 2024).

6. Effet des différentes modalités d'enrichissement sur les propriétés organoleptiques

L'aspect visuel des différentes formulations de cookies sans gluten est présenté dans le tableau 9.

Tableau 9 : Évaluation de l'aspect macroscopique des coockies formulations témoins et enrichies en extrait encapsulé

Témoin		Encapsulé plasmolysé 0,03%	

Encapsulé intacte 0,02%		Encapsulé plasmolysé 0,05%	
Encapsulé intacte 0,03%		Extrait brute 0,02%	
Encapsulé intacte 0,05%		Extrait brute 0,03%	
Encapsulé plasmolysé 0,02%		Extrait brute 0,05%	

L'évaluation sensorielle des différentes formulations de cookies sans gluten enrichis par un extrait de fruit sous forme libre, encapsulé dans des cellules intactes ou encapsulé dans des cellules plasmolysées, a été réalisée auprès d'un panel de 30 dégustateurs. Les attributs étudiés comprenaient l'apparence globale, la couleur, la croustillance, la friabilité, la dureté, l'adhésivité, l'arôme, le goût global ainsi que l'acceptabilité globale (**Figure 16**).

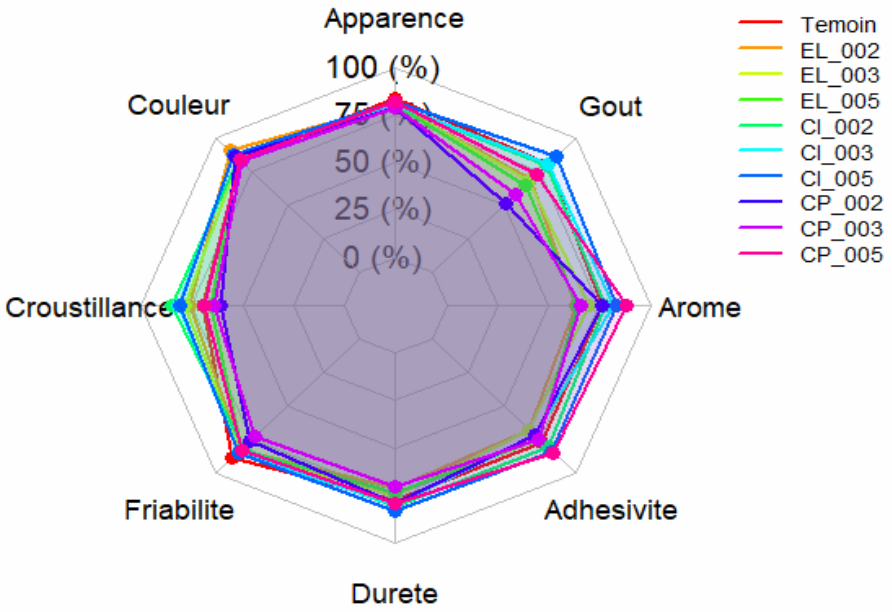


Figure 16 : Profil sensoriel des cookies sans gluten enrichis en extrait de *Myrtus communis* : Témoin (Temoin), Extrait libre (EL), Cellules intactes (CI) et Cellules plasmolysées (CP) à différentes concentrations

L'analyse sensorielle des formulations de cookies sans gluten enrichies en extrait de laurier, sous forme libre ou microencapsulée dans des cellules de levure intactes et plasmolysées, met en évidence une appréciation globalement élevée de l'ensemble des attributs évalués, avec une forte concentration des scores dans la partie supérieure de l'échelle hédonique (7–9). Cette tendance traduit une acceptabilité sensorielle élevée et une homogénéité des jugements entre les dégustateurs, indépendamment du type de formulation et de la concentration en extrait (0,02 %, 0,03 % et 0,05 %).

Pour l'apparence globale et la couleur, les scores restent élevés et relativement stables entre les différentes formulations, avec des valeurs moyennes comprises entre 7,93 et 8,73. L'absence de dégradation visuelle notable suggère une bonne compatibilité de l'extrait de *Myrtus communis* L. avec la matrice des cookies. Les différentes modalités d'incorporation de l'extrait, sous forme libre ou encapsulée, n'ont pas affecté les caractéristiques visuelles des cookies, qui ont maintenu une apparence uniforme et une structure intacte. Ces résultats indiquent une bonne dispersion des particules dans la pâte et confirment que l'incorporation de composés phénoliques n'altère pas les propriétés visuelles du produit final, en accord avec les observations rapportées pour des cookies enrichis en extraits végétaux encapsulés (Dordoni *et al.*, 2019 ; Indiarto *et al.*, 2022 ; Kaderides *et al.*, 2019).

Concernant les attributs texturaux (croustillance, friabilité, dureté et adhésivité), les résultats montrent une conservation globale des propriétés mécaniques du produit, avec des

variations dépendant du type de formulation. Les systèmes encapsulés dans des cellules intactes présentent globalement les scores les plus élevés, notamment pour la croustillance et la dureté, suggérant un effet protecteur de la matrice cellulaire sur l'interaction entre les composés bioactifs et le réseau amidon–protéines du cookie. À l'inverse, les cellules plasmolysées montrent une légère diminution de certains attributs texturaux, particulièrement à 0,02–0,03 %, pouvant être liée à une libération plus importante des composés hydrophiles et à une interaction accrue avec la matrice. Toutefois, ces différences restent modérées, indiquant que la microencapsulation ne perturbe pas significativement la structure texturale du produit final. Ces observations sont cohérentes avec les travaux de Chernenko (2025) et Ciont Călina *et al.* (2023), qui ont montré que les systèmes d'encapsulation cellulaire limitent les effets négatifs des composés phénoliques sur les propriétés texturales des matrices alimentaires.

Les attributs aromatiques et gustatifs montrent une variabilité plus marquée selon le type d'extrait et la concentration. L'extrait encapsulé dans des cellules intactes présente globalement les meilleures performances sensorielles, avec des valeurs atteignant 8,86 pour le goût global et 8,86 pour l'arôme dans certaines conditions, suggérant une libération contrôlée et harmonieuse des composés volatils. À l'inverse, les formulations contenant des cellules plasmolysées à faibles concentrations (0,02–0,03 %) montrent une diminution du goût global (jusqu'à 5,13), pouvant être attribuée à une libération déséquilibrée des composés bioactifs ou à des interactions défavorables avec la matrice, affectant la perception sensorielle. Cependant, à 0,05 %, une nette amélioration est observée, indiquant un effet seuil lié à la concentration et à la saturation du système.

La faible dispersion des réponses indique une bonne reproductibilité des évaluations et une perception homogène des attributs sensoriels au sein du panel. Cette homogénéité suggère que les différences entre formulations, bien que présentes numériquement, ne se traduisent pas par des écarts sensoriels marqués perçus par les dégustateurs. Elle confirme également que, dans les conditions expérimentales testées, le mode d'incorporation (libre vs encapsulé, cellules intactes vs plasmolysées) influence davantage la composition fonctionnelle que la perception sensorielle immédiate. Ces résultats sont en accord avec plusieurs études ayant montré que la microencapsulation de composés phénoliques dans des matrices alimentaires permet de préserver les qualités sensorielles tout en améliorant la stabilité et la fonctionnalité des produits (Dellapina *et al.,* 2025 ; Bińkowska *et al.,* 2024). De plus, des travaux récents

ont démontré que les systèmes à base de cellules de levure peuvent agir comme vecteurs efficaces de composés bioactifs tout en limitant leur impact sensoriel négatif, notamment sur l'amertume et l'astringence (Chernenko, 2025 ; Ciont Călina *et al.,* 2023). Ainsi, la plasmolyse apparaît comme une stratégie modulatrice permettant d'ajuster la libération des composés sans compromettre la qualité sensorielle globale.

CONCLUSION

CONCLUSION

Le présent travail s'inscrit dans une démarche de développement d'aliments fonctionnels innovants destinés à améliorer la qualité nutritionnelle des produits sans gluten, souvent caractérisés par une faible teneur en composés bioactifs et en micronutriments. Dans cette optique, les baies de *Myrtus communis* L., reconnues pour leur richesse en polyphénols et en flavonoïdes, ont été valorisées à travers l'extraction de leurs composés bioactifs, leur microencapsulation dans des cellules de *Saccharomyces cerevisiae* qu'elles soient intactes ou plasmolysées., puis leur incorporation dans une formulation de cookies sans gluten.

Les résultats obtenus ont montré que la microencapsulation constitue une stratégie efficace pour protéger les composés phénoliques du myrte et préserver leur activité biologique. Les cellules de levure plasmolysées ont présenté une capacité d'encapsulation supérieure à celle des cellules intactes, permettant une meilleure rétention des polyphénols et des flavonoïdes, ainsi qu'une activité antioxydante plus élevée. Cette amélioration est attribuée aux modifications structurales induites par la plasmolyse, qui favorisent l'incorporation et la rétention des molécules bioactives au sein des cellules.

L'enrichissement des cookies sans gluten avec les extraits encapsulés a significativement amélioré leur profil fonctionnel. Les formulations enrichies ont présenté des teneurs plus élevées en composés phénoliques et en flavonoïdes ainsi qu'une activité antioxydante supérieure à celle du témoin, démontrant l'intérêt de l'encapsulation pour limiter les pertes liées aux procédés technologiques. Par ailleurs, les différentes modalités d'enrichissement ont influencé plusieurs paramètres physicochimiques et nutritionnels des cookies, tout en maintenant des caractéristiques organoleptiques globalement satisfaisantes. Les formulations contenant les extraits encapsulés dans des cellules plasmolysées se sont révélées les plus performantes, combinant une meilleure préservation des composés bioactifs et une bonne qualité globale du produit fini.

Ainsi, cette étude confirme le potentiel de la microencapsulation par les cellules de *S. cerevisiae* comme technologie innovante de valorisation des ressources végétales riches en antioxydants. Elle démontre également que l'incorporation d'extraits de *Myrtus communis* L. encapsulés constitue une approche prometteuse pour la formulation de produits sans gluten à valeur ajoutée, répondant aux attentes croissantes des consommateurs en matière d'aliments fonctionnels et de santé.

Les résultats obtenus ouvrent de nouvelles perspectives de recherche, notamment l'étude de la stabilité des composés bioactifs encapsulés au cours du stockage, l'évaluation de leur biodisponibilité à travers des modèles de digestion gastro-intestinale simulée et

l’optimisation des paramètres de microencapsulation afin d’améliorer davantage le rendement d’encapsulation et la protection des molécules actives. Il serait également pertinent d’étendre l’application de cette technologie à d’autres produits alimentaires sans gluten tels que les pains, les gâteaux ou les boissons fonctionnelles, d’explorer l’utilisation d’autres ressources végétales locales riches en polyphénols. Enfin, des essais à l’échelle pilote et des études nutritionnelles plus approfondies permettraient de confirmer les bénéfices potentiels de ces formulations sur la santé humaine et de favoriser leur transfert vers une production industrielle .

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abd El-Malik, M., Hassan, A., & El-Sayed, S. (2025). Nutritional, antioxidant, and sensory properties of Ziziphus spina-christi fruit powder and its application in bakery products. Scientific Reports, 15, 43655.

Abdessemed, M., Bouacida, S., Turki, M., Ben Haj Koubaier, H., Omrani, S., Allouache, R., Bouzouita, N., Karoui, R., & Snoussi, A. (2024). Chemical characterization and biological activities evaluation of Myrtus communis L. essential oil extraction by-product towards circular economy and sustainability. Foods, 13(14), 2211.

Agarwal, V. S. (1986). Economic plants of India. Kailash Prakashan.

Ajeeshkumar, K. K., Aneesh, P. A., Raju, N., Suseela, M., Ravishankar, C. N., & Benjakul, S. (2021). Advancements in liposome technology : Preparation techniques and applications in food, functional foods, and bioactive delivery : A review. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 20(2), 1280–1306.

Akesowan, A. (2016). Influence of konjac flour on foaming properties of milk protein concentrate and quality characteristics of gluten-free cookie. International Journal of Food Science & Technology, 51(7), 1560–1569.

Akin, M., Aktumsek, A., & Nostro, A. (2010). Antibacterial activity of essential oils. African Journal of Biotechnology, 9(4), 531–535.

Aktürk Gümüşay, Ö., Cerit, İ., & Demirkol, O. (2025). Utilization of yeast cells as alternative carriers in the microencapsulation of black chokeberry (Aronia melanocarpa) phenolic extract. Foods, 14(4), 625.

Al-Hindawi, M. K., Al-Deen, I. H., Nabi, M. H., & Ismail, M. A. (1989). Anti-inflammatory activity of some Iraqi plants using intact rats. Journal of Ethnopharmacology, 26(2), 163–168.

Al-Maharik, N., Jaradat, N., Al-Hajj, N., & Jaber, S. (2023). Myrtus communis L. : Essential oil chemical composition, total phenols and flavonoids contents, antimicrobial, antioxidant, anticancer, and α-amylase inhibitory activity. Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences, 12, 94.

Al-Saimary, I. E., Bakr, S. S., Jaffar, T., Al-Saimary, A. E., Salim, H., & Al-Muosawi, R. (2002). Effects of some plant extracts and antibiotics on Pseudomonas aeruginosa isolated from various burn cases. Saudi Medical Journal, 23(7), 802–805.

Ali, M., & Ansari, S. H. (1994). Herbal drugs used as hair tonic. In Proceedings of the National Seminar on the Use of Traditional Medicinal Plants in Skincare (p. 20). CIMAP.

Ali, M. Y., Sina, A. A., Khandker, S. S., Neesa, L., Tanvir, E. M., Kabir, A., Khalil, M. I., & Gan, S. H. (2020). Nutritional composition and bioactive compounds in tomatoes and their impact on human health and disease : A review. Foods, 10(1), 45.

Aljobair, M. O. (2022). Physicochemical properties and sensory attributes of cookies prepared from sorghum and millet composite flour. *Food Science & Nutrition, 10*(6), 1780–1790.

Alem, G., Mekonnen, Y., Tiruneh, M., & Mulu, A. (2008). In vitro antibacterial activity of crude preparation of myrtle (Myrtus communis) on common human pathogens. Ethiopian Medical Journal, 46(1), 63–69.

Altındağ, G., Certel, M., Erem, F., & Konak, Ü. İ. (2015). Quality characteristics of gluten-free cookies made of buckwheat, corn, and rice flour with/without transglutaminase. Food Science and Technology International, 21(3), 213–220.

Amensour, M., Bouhdid, S., Fernández-López, J., Idaomar, M., Senhaji, N. S., & Abrini, J. (2010). Antibacterial activity of extracts of Myrtus communis against food-borne pathogenic and spoilage bacteria. International Journal of Food Properties, 13(6), 1215–1224.

Anal, A. K., & Singh, H. (2007). Recent advances in microencapsulation of probiotics for industrial applications and targeted delivery. Trends in Food Science & Technology, 18(5), 240–251.

AOAC. (1984). Official methods of analysis (14th ed.). Association of Official Analytical Chemists.

AOAC. (2005). Official methods of analysis (18th ed.). Association of Official Analytical Chemists.

Armendáriz-Barragán, B., Zafar, N., Badri, W., Galindo-Rodríguez, S. A., Kabbaj, D., Fessi, H., & Elaissari, A. (2016). Plant extracts : From encapsulation to application. Expert Opinion on Drug Delivery, 13(8), 1165–1175.

Arnone, D., Chabot, C., Heba, A. C., Kökten, T., Caron, B., Hansmannel, F., Dreumont, N., Ananthakrishnan, A. N., Quilliot, D., & Peyrin-Biroulet, L. (2022). Sugars and gastrointestinal health. Clinical Gastroenterology and Hepatology, 20(9), 1912–1914.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Associação Brasileira das Indústrias de Biscoitos, Massas Alimentícias e Pães & Bolos Industrializados. (2020). Estatísticas de vendas.

Atwater, W. O., & Rosa, E. B. (1899). Description of a new respiration calorimeter and experiments on the conservation of energy in the human body (Bulletin No. 63). U.S. Department of Agriculture, Office of Experiment Stations.

Ayvaz, A., Sagdic, O., Karaborklu, S., & Ozturk, I. (2010). Insecticidal activity of the essential oils from different plants against three stored-product insects. Journal of Insect Science, 10(21), 1–13.

Baitar, Z. I. (1999). *Aljameul mufradat al-advia-wa-al-aghzia* (Vol. 1). CCRUM.

Baliyan, S., Mukherjee, R., Priyadarshini, A., Vibhuti, A., Gupta, A., Pandey, R., & Chang, C. M. (2022). Determination of antioxidants by DPPH radical scavenging activity and quantitative phytochemical analysis of *Ficus religiosa*. *Molecules, 27*(4), 1326.

Baptist, N. G. (1954). Essential amino acids of some common tropical legumes and cereals. *British Journal of Nutrition, 8*(3), 218–222.

Barboni, T., Cannac, M., Massi, L., Perez-Ramirez, Y., & Chiaramonti, N. (2010). Variability of polyphenol compounds in *Myrtus communis* L. (Myrtaceae) berries from Corsica. *Molecules, 15*(11), 7849–7860.

Belahcene, S., Kebsa, W., Akingbade, T., Umar, H. I., Omoboyowa, D., Alshihri, A. A., Mansour, A. A., Alhasaniah, A., Oraig, M. A., Bakkour, Y., & Leghouchi, E. (2024). Chemical composition, antioxidant and anti-inflammatory activities of *Myrtus communis* L. leaf extract: Forecasting ADMET profiling and anti-inflammatory targets using molecular docking tools. *Molecules, 29*(4), 849.

Belli, G., Belli, L., Biondi, M., & Polzonetti, V. (2016). Gluten-free diet and nutrient deficiencies: A review. *Clinical Nutrition, 35*(6), 1236–1241.

Belorio, M., & Gómez, M. (2020). Effect of hydration on gluten-free breads made with hydroxypropyl methylcellulose in comparison with psyllium and xanthan gum. *Foods, 9*(11), 1548.

Beloued, A. (2005). *Plantes médicinales d'Algérie et du Maghreb*. Office des Publications Universitaires.

Benallouache, H., & Aberkane, A. (2021). Nutritional composition of gluten-free flours. *Journal of Food Technology, 19*(2), 45–52.

Benchikh, F., Benabdallah, H., Amira, H., Mamache, W., & Amira, S. (2022). Free radical scavenging, reducing power and lipid peroxidation inhibition activities of *Myrtus communis* berries methanol extract and its fractions. *Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology, 10*(4), 760–765. <

Bertolo, A. P., Biz, A. P., Kempka, A. P., Rigo, E., & Cavalheiro, D. (2019). Yeast (*Saccharomyces cerevisiae*): Evaluation of cellular disruption processes, chemical composition, functional properties and digestibility. *Journal of Food Science and Technology, 56*(8), 3697–3706.

Bertrand, G., & Thomas, R. (1910). *Chimie biologique*. Masson.

Bińkowska, W., Szpicer, A., Stelmasiak, A., Wojtasik-Kalinowska, I., & Półtorak, A. (2024). *Innovative application of microencapsulated polyphenols in cereal products: Optimization of the formulation of dairy- and gluten-free pastry*. *Journal of Food Process Engineering, 47*(7), e14685.

Bińkowska, W., Szpicer, A., Stelmasiak, A., Wojtasik-Kalinowska, I., & Półtorak, A. (2024). *Microencapsulation of polyphenols and their application in food technology*. *Applied Sciences, 14*(24), 11954.

Bishop, J. R. P., Nelson, G., & Lamb, J. (1998). Microencapsulation in yeast cells. *Journal of Microencapsulation, 15*(6), 761–773.

Blois, M. S. (1958). Antioxidant determinations by the use of a stable free radical. *Nature, 181*, 1199–1200.

Bolarinwa, I. F., Lim, P. T., & Kharidah, M. (2019). Quality of gluten-free cookies from germinated brown rice flour. *Food Research, 3*(3), 199–207.

Bou Attia, A., et al. (2014). Chemical composition of *Myrtus communis* L. berries. *Journal of New Sciences, 12*(4), 1–6.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bouchenak, O., Yahiaoui, K., Benhabyles, N., Laoufi, R., Toubal, S., El Haddad, D., ... & Arab, K. (2020). Criblage phytochimique et évaluation du pouvoir antioxydant des feuilles de myrtus communis l. et rhamnus alaternus L. Agrobiologia, 10(1), 1749-1761.

Bourekoua, H., et al. (2018). Polyphenol-lipid interactions in bakery products. *LWT – Food Science and Technology, 89*, 123–129.

Bourekoua, H., et al. (2023). Gluten-free snacks enriched with encapsulated plant extracts. *Journal of Food Measurement and Characterization, 17*(2), 1123–1133.

Brito, I. L., Souza, E. L., Felex, S. S. S., Madruga, M. S., Yamashita, F., & Magnani, M. (2015). Nutritional and sensory characteristics of gluten-free quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.)-based cookies development using an experimental mixture design. *Journal of Food Science and Technology, 52*(9), 5866–5873.

Brouns, F., van Rooy, G., Shewry, P., Rustgi, S., & Jonkers, D. (2019). Adverse reactions to wheat or wheat components. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 18*(5), 1437–1452.

Bugarin, D., Mitić-Ćulafić, D., Svirčev, E., Šundić, M., & Mimica-Dukić, N. M. (2024). Bioactivity of *Myrtus communis* from the Montenegro coastline. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas, 23*(1), 54–67.

Caseiro, M., Ascenso, A., Costa, A., Creagh-Flynn, J., Johnson, M., & Simões, S. (2020). Lycopene in human health. LWT, 127, 109323.

Cassidy, A. (2018). Berry anthocyanin intake and cardiovascular health. Molecular Aspects of Medicine, 61, 76–82.

Cegledi, E., Garofulić, I. E., Zorić, Z., Rojo, M., & Dragović-Uzelac, V. (2022). Effect of spray drying encapsulation on nettle leaf extract powder properties, polyphenols and their bioavailability. Foods, 11(18), 2852.

Chacón-Figueroa, I. H., Dórame-Miranda, R. F., López-Ahumada, G. A., Del-Toro-Sánchez, C., Ovando-Martínez, M., Gámez-Meza, N., Martínez-Bustos, F., Rodríguez-Figueroa, J. C., Gerardo-Rodríguez, J. E., Whitney, K., Bernal-Mercado, A. T., Plascencia-Jatomea, M., & Herrera-Jiménez, V. M. (2025). Microencapsulation of spent coffee extract within Saccharomyces cerevisiae cells via spray drying and evaluation of its in vitro bioaccessibility. Foods, 14(6), 1053.

Chalchat, J., Garry, R. P., & Michet, A. (1998). Essential oils of myrtle of the Mediterranean littoral. Journal of Essential Oil Research, 10(6), 613–617.

Chandpuri, K. (1988). Moojizal Qanoon. Lahore Print Aids.

Chang, C. C., Yang, M. H., Wen, H. M., & Chern, J. C. (2002). Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. Journal of Food and Drug Analysis, 10(3), 178–182.

Chen, Y., Belwal, T., Xu, Y., Ma, Q., Li, D., Li, L., Xiao, H., & Luo, Z. (2022). Updated insights into anthocyanin stability behavior from bases to cases: Why and why not anthocyanins lose during food processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 62*(10), 2730–2754.

Chernenko, S. (2025). Encapsulation of polyphenols in baked goods: A strategy for enhancing stability and antioxidant activity. *Technology Audit and Production Reserves, 4*(3(84)), 45–51.

Chernenko, S. O. (2025). The impact of encapsulated polyphenols on the glycemic index and antioxidant activity of gluten-free baked goods. Journal of Chemistry and Technologies, 33(3).

Chongsrimsirisakhol, O., & Pirak, T. (2023). Polyphenol release and antioxidant activity of the encapsulated antioxidant crude extract from cold brew spent coffee grounds under simulated food processes and an in vitro static gastrointestinal model. Foods, 12, 902.

Chopra, R. N., Nayar, S. L., & Chopra, I. C. (1956). Glossary of Indian medicinal plants. CSIR.

Ciccolini, L., Taillandier, P., Wilhem, A., Delmas, H., & Strehaiano, P. (1997). Low frequency thermo-ultrasonication of Saccharomyces cerevisiae suspensions : Effect of temperature and ultrasonic power. Chemical Engineering Journal, 65(2), 145–149.

Ciont, C., Difonzo, G., Pasqualone, A., Chiș, M. S., Ranga, F., Szabó, K., Simon, E., Naghiu, A., Barbu-Tudoran, L., Caponio, F., Pop, O. L., & Vodnar, D. C. (2023). Phenolic profile of micro- and nano-encapsulated olive leaf extract in biscuits during in vitro gastrointestinal digestion. *Food Chemistry, 404*, 134560. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134560

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Clerici, M. T. P. S., Airoldi, C., & El-Dash, A. A. (2009). Production of acidic extruded rice flour and its influence on the qualities of gluten-free bread. LWT – Food Science and Technology, 42(2), 618–623.

Clerici, M. T. P. S., & El-Dash, A. A. (2006). Farinha extrusada de arroz como substituto de glúten na produção de pão de arroz. Archivos Latinoamericanos de Nutrición, 56(3), 288–298.

Coleman, J. S. (1970). Equality of educational opportunity. U.S. Department of Health, Education, and Welfare, Office of Education.

Coradello, G., Setti, C., Donno, R., Ghibaudi, M., Catalano, F., & Tirelli, N. (2024). A quantitative re-assessment of microencapsulation in (pre-treated) yeast. Molecules, 29(2), 539.

Coradello, G., & Tirelli, N. (2021). Yeast cells in microencapsulation: General features and controlling factors of the encapsulation process. *Molecules*, *26*(11), 3223.

Cosme, F., Aires, A., Pinto, T., Oliveira, I., Vilela, A., & Gonçalves, B. (2025). A comprehensive review of bioactive tannins in foods and beverages : Functional properties, health benefits, and sensory qualities. Molecules, 30(4), 800.

Council of Scientific & Industrial Research. (1962). The wealth of India : A dictionary of Indian raw materials and industrial products (Vol. 6). CSIR.

Council of Scientific & Industrial Research. (1992). The useful plants of India. CSIR.

Culețu, A., Duță, D. E., Papageorgiou, M., & Varzakas, T. (2021). The role of hydrocolloids in gluten-free bread and pasta : Rheology, characteristics, staling and glycemic index. Foods, 10(12), 3121.

Curini, M., Bianchi, A., Epifano, F., Bruni, R., Torta, L., & Zambonelli, A. (2003). In vitro antifungal activity of essential oils of Erigeron canadensis and Myrtus communis from France. Chemistry of Natural Compounds, 39(2), 191–194.

Cvitković, D., Mrvčić, J., Dobroslavić, E., Dragović-Uzelac, V., & Balbino, S. (2025). Retention and antimicrobial activity of alginate-encapsulated bioactive compounds from leaves and fruits of myrtle (Myrtus communis L.). Processes, 13(4), 1220.

Czerniak, A., Kubiak, P., Białas, W., & Jankowski, T. (2015). Improvement of oxidative stability of menhaden fish oil by microencapsulation within biocapsules formed of yeast cells. Journal of Food Engineering, 167, 2–11.

Dadkhodazade, E., Khanniri, E., Khorshidian, N., Hosseini, S. M., Mortazavian, A. M., & Moghaddas Kia, E. (2021). Yeast cells for encapsulation of bioactive compounds in food products : A review. Biotechnology Progress, 37(4), e3138.

Dadkhodazade, E., Mohammadi, A., Shojaee-Aliabadi, S., Mortazavian, A. M., Mirmoghtadaie, L., & Hosseini, S. M. (2018). Yeast cell microcapsules as a novel carrier for cholecalciferol encapsulation : Development, characterization and release properties. Food Biophysics, 13(4), 404–411.

Dai, J., & Mumper, R. J. (2010). Plant phenolics : Extraction, analysis and their antioxidant and anticancer properties. Molecules, 15(10), 7313–7352.

Dai, T., Chen, J., McClements, D. J., Hu, P., Ye, X., Liu, C., & Li, T. (2019). Protein–polyphenol interactions enhance the antioxidant capacity of phenolics : Analysis of rice glutelin–procyanidin dimer interactions. Food & Function, 10(2), 765–774.

Davidson, L. (2018). Biscuit, cookie and cracker production : Process, production and packaging equipment. Elsevier.

Davis, J. M., Murphy, E. A., & Carmichael, M. D. (2009). Effects of the dietary flavonoid quercetin upon performance and health. Current Sports Medicine Reports, 8(4), 206–213.

De la Barca, A. M. C., Rojas-Martínez, M. E., Islas-Rubio, A. R., & Cabrera-Chávez, F. (2010). Gluten-free breads and cookies of raw and popped amaranth flours with attractive technological and nutritional qualities. Plant Foods for Human Nutrition, 65(3), 241–246.

De Oliveira, P. F., Ávila, P. F., dos Santos, M. M. C., Meirelles, L. M., & Ramos, L. F. (2024). Antioxidant, antimutagenic, and hypoglycemic properties of flours by different parts of marolo (Annona crassiflora Mart.) seeds : Film and almond. Food Research International, 196, 115087.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

De Rossi, L., Rocchetti, G., Lucini, L., & Rebecchi, A. (2025). Antimicrobial potential of polyphenols : Mechanisms of action and microbial responses—A narrative review. Antioxidants, 14(2), 200.

Dellapina, A., Rizzo, V., & Bertini, S. (2025). Encapsulation of citrus by-products extracts for the nutritional enrichment of gluten-free oat and buckwheat cookies. Foods, 14(2).

Deuruaz, D., & Raynaud, J. (1993). Evaluation of the molluscicidal properties of Myrtus communis Linn. Phytotherapy Research, 7(6), 428–430.

Di Sabatino, A., & Corazza, G. R. (2009). Coeliac disease. The Lancet, 373(9673), 1480–1493.

Diaz, A. M., & Abeger, A. (1986). Determination of tannins in seeds of Myrtus communis. Anales de la Real Academia de Farmacia, 52(1), 117–122.

Diaz, A. M., & Abeger, A. (1987). Phenolic compounds. Planta Medica Phytotherapy, 21(4), 317–322.

Dimopoulos, G., Katsimichas, A., Tsimogiannis, D., Oreopoulou, V., & Taoukis, P. (2021). Cell permeabilization processes for improved encapsulation of oregano essential oil in yeast cells. Journal of Food Engineering, 294, 110408.

Dineel, A. S., Acikgoz, S., Cevik, C., Sengelen, M., & Yesilada, E. (2007). Effects of in vivo antioxidant enzyme activities of myrtle oil in normoglycemic and alloxan diabetic rabbits. Journal of Ethnopharmacology, 110(3), 498–503.

Dogan, A. (1978). Investigations on Myrtus communis L. Ankara University.

Dordoni, R., Duserm Garrido, G., Marinoni, L., Torri, L., Piochi, M., & Spigno, G. (2019). Enrichment of whole wheat cocoa biscuits with encapsulated grape skin extract. *International Journal of Food Science, 2019,* Article 9161840.

Dossa, S., Dragomir, C., Plustea, L., Dinulescu, C., Cocan, I., Negrea, M., Berbecea, A., Alexa, E., & Riviș, A. (2023). Gluten-free cookies enriched with baobab flour (*Adansonia digitata* L.) and buckwheat flour (*Fagopyrum esculentum*). *Applied Sciences, 13*(23), 13015.

Durazzo, A., Lucarini, M., Souto, E. B., Cicala, C., Caiazzo, E., Izzo, A. A., Novellino, E., & Santini, A. (2019). Polyphenols : A concise overview on the chemistry, occurrence, and human health. Phytotherapy Research, 33(9), 2221–2243.

Duta, D. E., & Culetu, A. (2015). Evaluation of rheological, physicochemical, thermal, mechanical and sensory properties of oat-based gluten-free cookies. Journal of Food Engineering, 162, 1–8.

Ebrahimi, P., Lante, A., & Grossmann, L. (2025). Protein–polyphenol complexation vs. Conjugation : A review on mechanisms, functional differences, and antioxidant-emulsifier roles. Food Hydrocolloids, 164, 111590.

El Hammadi, N., Almajano, M. P., Pastor, M. V., & Codina-Torrella, I. (2024). Evaluating the incorporation of Myrtus communis L. leaves infusion in alginate-based films and spheres to enhance the oxidative stability of oil-in-water emulsions. Polymers, 16(5), 649.

Elfellah, M. S., Akhter, M. H., & Khan, M. T. (1984). Antihyperglycaemic effect of an extract of Myrtus communis in streptozotocin-induced diabetes in mice. Journal of Ethnopharmacology, 11(3), 275–281.

Encina-Zelada, C., Cadavez, V., Monteiro, F., Teixeira, J. A., & Gonzales-Barrón, Ú. (2018). Combined effect of xanthan gum and water content on physicochemical and textural properties of gluten-free batter and bread. Food Research International, 111, 544–555.

Errenst, C., Petermann, M., & Kilzer, A. (2021). Encapsulation of limonene in yeast cells using the concentrated powder form technology. The Journal of Supercritical Fluids, 168, 105076.

Esfanjani, A. F., Assadpour, E., & Jafari, S. M. (2018). Improving the bioavailability of phenolic compounds by loading them within lipid-based nanocarriers. Trends in Food Science & Technology, 76, 56–66.

Fahim, A. B., El-Ghaithi, M., Amesh, S., & Dhayabaran, D. (2009). Biochemical studies on the effect of phenolic compounds extracted from Myrtus communis in diabetic rats. Tamilnadu Journal of Veterinary and Animal Sciences, 5(3), 87–93.

Fang, Z., & Bhandari, B. (2010). Encapsulation of polyphenols : A review. Trends in Food Science & Technology, 21(10), 510–523.

Fărcaș, A. C., Socaci, S. A., & Tofană, M. (2022). Thermal degradation of polyphenols in gluten-free biscuits during baking. Journal of Cereal Science, 104, 103427.

Feisst, C., et al. (2005). Anti-inflammatory compounds from myrtle. Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics, 315(1), 389–396.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Feizollahi, E., Hadian, Z., & Honarvar, Z. (2018). Food fortification with omega-3 fatty acids : Microencapsulation as an addition method. Current Nutrition & Food Science, 14(2), 90–103.

Fernandes, S. S., Coelho, M. S., & de las Mercedes Salas-Mellado, M. (2019). Bioactive compounds as ingredients of functional foods : Polyphenols, carotenoids, peptides from animal and plant sources. In C. M. Galanakis (Ed.), Bioactive compounds : Properties, applications, and health benefits (pp. 129–142). Woodhead Publishing.

Flaminia, G., Cioni, P. L., Morelli, I., Maccioni, S., & Baldini, R. (2004). Phytochemical typologies in populations of Myrtus communis L. from Sardinia. Food Chemistry, 85(4), 599–604.

Fu, J., Song, L., Guan, J., Sun, C., Zhou, D., & Zhu, B. (2021). Encapsulation of Antarctic krill oil in yeast cell microcarriers : Evaluation of oxidative stability and in vitro release. Food Chemistry, 338, 128089.

Fuentes-Zaragoza, E., Sánchez-Zapata, E., Sendra, E., Sayas, E., Navarro, C., Fernández-López, J., & Pérez-Alvarez, J. A. (2011). Resistant starch as prebiotic : A review. Starch/Stärke, 63(7), 406–415.

Galiniak, S., Aebisher, D., & Bartusik-Aebisher, D. (2019). Health benefits of resveratrol administration. Acta Biochimica Polonica, 66(1), 13–21.

Ganeva, V., Galutzov, B., & Teissie, J. (2014). Evidence that pulsed electric field treatment enhances the cell wall porosity of yeast cells. Applied Biochemistry and Biotechnology, 172(3), 1540–1552.

Gani, A., Haq, S. S., Masoodi, F. A., Broadway, A. A., & Gani, A. (2010). Physico-chemical, morphological and pasting properties of starches extracted from water chestnuts (*Trapa natans*) from three lakes of Kashmir, India. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, *53*(3), 731–740.

Gauthier, R., Agoumi, A., & Gourai, M. (1988). Activity of the extracts of Myrtus communis against Pediculus humanus capitis. Planta Medica et Phytothérapie, 23(2), 25–108.

Ghani, M. N. (1920). Khazainul advia (Vol. 3). Sheikh Mohammad Bashir and Sons.

Giacomo, M. (1983). Volatile components of myrtle berries. Journal of Chromatography, 264, 304–311.

Giuberti, G., Rocchetti, G., Sigolo, S., Fortunati, P., Lucini, L., & Gallo, A. (2018). Exploitation of alfalfa seed (Medicago sativa L.) flour into gluten-free rice cookies : Nutritional, antioxidant and quality characteristics. Food Chemistry, 239, 679–687.

Giosuè, A., Bianchi, F., Pala, V., Scazzina, F., Del Rio, D., Brighenti, F., & Dinu, M. (2024). Red grape pomace as a functional ingredient in biscuits. Foods, 13(15), 2417.

Gonçalves, A., Estevinho, B., & Rocha, F. (2021). Methodologies for simulation of gastrointestinal digestion of different controlled delivery systems and further uptake of encapsulated bioactive compounds. Trends in Food Science & Technology, 111, 132–151.

Gorjian, H., Amiri, Z. R., Milani, J. M., & Khaligh, N. G. (2022). Influence of nanovesicle type, nanoliposome and nanoniosome, on antioxidant and antimicrobial activities of encapsulated myrtle extract : A comparative study. Food and Bioprocess Technology, 15(4), 907–920.

Grgić, J., Šelo, G., Planinić, M., Tišma, M., & Bucić Kojić, A. (2020). Role of the encapsulation in bioavailability of phenolic compounds. Antioxidants, 9(10), 923.

Grand View Research. (2022). Gluten-free products market size report, 2022–2030. Grand View Research.

Gulcin, I., & Alwasel, S. (2023). DPPH radical scavenging assay. Processes, 11(8), 2248.

Guerrero, S., López-Malo, A., & Alzamora, S. M. (2001). Effect of ultrasound on the survival of Saccharomyces cerevisiae : Influence of temperature, pH and amplitude. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2(1), 31–39.

Günal-Köroğlu, D., Bilgin, A. B., Karabulut, G., Saricaoglu, B., & Çapanoğlu, E. (2024). Encapsulation of hydrophobic compounds in yeast cells: Methods, characterization, and applications. *Exploration of Foods and Foodomics*, *2*, 113–132.

Hacıseferoğulları, H., Özcan, M. M., Arslan, D., & Ünver, A. (2012). Biochemical compositional and technological characterizations of black and white myrtle (*Myrtus communis* L.) fruits. *Journal of Food Science and Technology, 49*(6), 686–694.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Hakeem, M. A. (1895). *Bustanul mufradat*. Idara Tarraqui Urdu Publications.

Han, J., Janz, J. A. M., & Gerlat, M. (2010). Development of gluten-free cracker snacks using pulse flours and fractions. *Food Research International, 43*(2), 627–633.

Hayder, N., Bouhlel, I., Skandrani, I., Kadri, M., Steiman, R., Guiraud, P., Mariotte, A. M., Ghedira, K., Dijoux-Franca, M. G., & Chekir-Ghedira, L. (2008). In vitro antioxidant and antigenotoxic potentials of myricetin derivatives from *Myrtus communis*: Modulation of gene expression involved in cell defence system using cDNA microarray. *Toxicology in Vitro, 22*(3), 567–581.

Hayder, N., Abdelwahed, A., Kilani, S., Ammar, R. B., Mahmoud, A., Ghedira, K., Chekir-Ghedira, L., & Mariotte, A. M. (2004). Anti-genotoxic and free radical scavenging activities of extracts from *Myrtus communis*. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, 564*(1), 89–95.

Hinou, J., Lakkas, N., & Philianos, S. (1988). Constituants polyphénoliques de *Myrtus communis* L. *Planta Medica et Phytothérapie, 22*, 98–103.

Horstmann, S. W., Lynch, K. M., & Arendt, E. K. (2017). Starch characteristics linked to gluten-free products. Foods, 6(4), 29.

Hosseini, H., & Jafari, S. M. (2020). Introducing nano/microencapsulated bioactive ingredients for extending the shelf-life of food products. Advances in Colloid and Interface Science, 282, 102210.

Huo, J., Wang, L., Ma, J., Yue, X., Wang, K., Ma, X., Yu, X., & Xiao, Z. (2024). Different effects of polyphenols on hydration, pasting and rheological properties of rice starch under extrusion condition : From the alterations in starch structure. Food Chemistry, 457, 142002.

Hussain, A., Mouhaddach, A., Khalid, I., Kausar, T., Bouhrim, M., Shahat, A., Noman, O. M., Eto, B., Yaqub, S., Arshad, R., Farooq, H., Firdous, N., & Bilal, M. (2025). Nutritional, bioactive, and antimicrobial analysis of powders and ethanolic extracts of three important halophyte plants (Anabasis articulata, Lycium shawii, & Zilla spinosa), and their application in bakery product. Frontiers in Sustainable Food Systems, 9, 1509423.

Hussain, S. A., Hameed, A., Nazir, Y., Naz, T., Wu, Y., Suleria, H. A. R., & Song, Y. (2018). Microencapsulation and the characterization of polyherbal formulation rich in natural polyphenolic compounds. Nutrients, 10(7), 843.

Indiarto, R., Reni, R., Utama, G. L., Subroto, E., Pangawikan, A. D., & Djali, M. (2022). Physicochemical, antioxidant, and sensory properties of chocolate biscuits incorporated with encapsulated mangosteen peel extract. *International Journal of Food Properties, 25*(1), 1123–1135.

Instituto de Tecnologia de Alimentos (ITAL). (2020). Biscoitos industrializados : Nutrição e indulgência na cultura alimentar. BB Editora.

Islam Shishir, M. R., Taip, F. S., Aziz, N. A., Talib, R. A., & Hossain Sarker, M. (2016). Optimization of spray drying parameters for pink guava powder using RSM. Food Science and Biotechnology, 25(2), 461–468.

Jan, K. N., Panesar, P. S., & Singh, S. (2018). Optimization of antioxidant activity, textural and sensory characteristics of gluten-free cookies made from whole Indian quinoa flour. LWT, 93, 573–582.

Jerkovic, I., Radonic, A., & Borcic, I. (2002). Essential oils of Myrtus communis. Journal of Essential Oil Research, 14(4), 266–270.

Jnawali, P., Kumar, V., & Tanwar, B. (2016). Celiac disease : Overview and considerations for development of gluten-free foods. Food Science and Human Wellness, 5(4), 169–176.

Kabiruddin, M. (1951). Makhzan-ul-mufradat. Sheikh Mohammad Bashir and Sons.

Kaderides, K., Mourtzinos, I., & Goula, A. M. (2019). Stability of pomegranate peel polyphenols encapsulated in an orange juice industry by-product and their incorporation into biscuits. *Food Chemistry, 275*, 386–393.

Kahkeshani, N., Farzaei, F., Fotouhi, M., Alavi, S. S., Bahramsoltani, R., Naseri, R., Momtaz, S., Abbasabadi, Z., Rahimi, R., Farzaei, M. H., & Bishayee, A. (2019). Pharmacological effects of gallic acid in health and diseases : A mechanistic review. Iranian Journal of Basic Medical Sciences, 22(3), 225–237.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Kalinina, I., Fatkullin, R., & Naumenko, N. (2024). Use of plasmolysed yeast to encapsulate and enhance the bioavailability of plant antioxidants. Food Processing : Techniques and Technology, 54, 65–73.

Kalinina, I., Fatkullin, R., Naumenko, N., Ruskina, A., Popova, N., & Naumenko, E. (2022). Increasing the efficiency of taxifolin encapsulation in Saccharomyces cerevisiae yeast cells based on ultrasonic microstructuring. Fermentation, 8(8), 378.

Kalinová, J., Vrchotová, N., & Tříska, J. (2024). Flavonoids profile in pasta and cookies fortified with common buckwheat sprouts or microgreens flour. Journal of Cereal Science, 116, 103880.

Kan, L., Nie, S., Hu, J., Wang, S., Cui, S. W., Li, Y., Xu, S., Wu, Y., Wang, J., Bai, Z., & Xie, M. (2017). Nutrients, phytochemicals and antioxidant activities of 26 kidney bean cultivars. Food and Chemical Toxicology, 108(Part B), 467–477.

Karaman, K. (2020). Characterization of Saccharomyces cerevisiae-based microcarriers for encapsulation of black cumin seed oil : Stability of thymoquinone and bioactive properties. Food Chemistry, 313, 126129.

Karaman, K., Pınar, H., Çiftçi, B., & Kaplan, M. (2025). Effects of banana flour on some physicochemical, textural, bioactive, and sensory properties of gluten-free cookie. *Food Science & Nutrition, 13*(1), 123–135.

Kavosi, M., Mohammadi, A., Shojaee-Aliabadi, S., Khaksar, R., & Hosseini, S. M. (2018). Characterization and oxidative stability of purslane seed oil microencapsulated in yeast cells biocapsules. Journal of the Science of Food and Agriculture, 98(7), 2490–2497.

Keceli, T., & Simsek Mertoglu, T. (2024). Antioxidant and antimicrobial activities of Myrtus communis essential oils in cold-stored lactic butter. Journal of the Science of Food and Agriculture, 104(15), 9322–9332.

Kharat, M., Du, Z., Zhang, G., & McClements, D. J. (2017). Physical and chemical stability of curcumin in aqueous solutions and emulsions : Impact of pH, temperature, and molecular environment. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 65(8), 1525–1532.

Kilcher, G., Delneri, D., Duckham, C., & Tirelli, N. J. (2008). Probing (macro)molecular transport through cell walls. Faraday Discussions, 139, 199–212.

Kirtikar, K. R., & Basu, B. D. (1988). Indian medicinal plants (3rd ed., Vol. 2). International Book Distributors.

Kogan, G., Kocher, A., Chmelár, P., Jantová, S., & Stankovská, M. (2008). Yeast cell wall polysaccharides as antioxidants and antimutagens : Can they fight cancer ? Neoplasma, 55(5), 387–393.

Koh, W. Y., et al. (2023). Spent tea leaf powder in gluten-free cookies. Foods, 12(7), 1557.

Križková, L. V., Ďuračková, Z., Šandula, J., Sasinková, V., & Krajčovič, J. (2001). Antioxidative and antimutagenic activity of yeast cell wall mannans in vitro. Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, 497(1–2), 213–222.

Kris-Etherton, P. M., Hecker, K. D., Bonanome, A., Coval, S. M., Binkoski, A. E., Hilpert, K. F., Griel, A. E., & Etherton, T. D. (2002). Bioactive compounds in foods : Their role in the prevention of cardiovascular disease and cancer. The American Journal of Medicine, 113(9, Suppl. 9B), 71S–88S.

Kruczek, M., Gumul, D., Korus, A., Buksa, K., & Ziobro, R. (2023). Phenolic compounds and antioxidant status of cookies supplemented with apple pomace. Antioxidants, 12(2), 458.

Krupa-Kozak, U., Bączek, N., Capriles, V. D., & Łopusiewicz, Ł. (2022). Novel gluten-free bread with an extract from flaxseed by-product : The relationship between water replacement level and nutritional value, antioxidant properties, and sensory quality. Molecules, 27(9), 2690.

Křišťanová, M., Škorpilová, T., & Dvořáková, P. (2023). Encapsulation of anthocyanins for gluten-free biscuit applications. Food Research International, 165, 112489.

Kurek, M. A., Majek, M., Onopiuk, A., Szpicer, A., Napiórkowska, A., & Samborska, K. (2023). Encapsulation of anthocyanins from chokeberry (Aronia melanocarpa) with plasmolyzed yeast cells of different species. Food and Bioproducts Processing, 137, 84–92.

Kurkin, V. A., Khusainova, A. I., Kurkina, A. V., Bakova, N. N., & Bakova, E. Yu. (2021). Développement d'une méthode de détermination quantitative de la teneur totale en flavonoïdes

dans les feuilles de myrte commun (*Myrtus communis* L.). *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya, (1)*, 159–166

Lafarga, T. (2019). Effect of microalgae and seaweed supplementation on cardiovascular disease risk factors : A review. Marine Drugs, 17(11), 604.

Laib, D. E., Laib, I., Bendif, H., Alsalamah, S. A., Taha, T. H., Boufahja, F., Elfalleh, W., & Garzoli, S. (2026). Plasmolyzed yeast cell system for the encapsulation of Pulicaria odora polyphenols : RSM-based process optimization and functional characterization. Food Science and Biotechnology. Advance online publication.

Leonard, M. M., Sapone, A., Catassi, C., & Fasano, A. (2017). Celiac disease and nonceliac gluten sensitivity: A review. *JAMA, 318*(7), 647–656.

Levickienė, D., Kulaitienė, J., Vaitkevičienė, N., & Rakauskaitė, L. (2024). Influence of mulberry leaf powder additive on chemical and physical characteristics of wheat and rice flour butter cookies. Foods, 13(11), 1737.

Lieu, D. M., Vo, L. T. K., Le, H. G., Nguyen, T. T. B., & Dang, T. T. K. (2024). Yeast cell as a potential microcapsule of bioactive compounds : An overview. Nutrire, 49, 12.

Lieu, M. D., Hoang, T. T. H., Nguyen, H. N. T., & Dang, T. K. T. (2020). Evaluation of anthocyanin encapsulation efficiency into yeast cell by plasmolysis, ethanol, and ultrasound treatments using alone or in combination. Food Research, 4(2), 557–562.

Lila, M. A., Burton-Freeman, B., Grace, M., & Kalt, W. (2016). Unraveling anthocyanin bioavailability for human health. Annual Review of Food Science and Technology, 7, 375–393.

Liu, S., Tao, M., & Huang, K. (2021). Encapsulation of mānuka essential oil in yeast microcarriers for enhanced thermal stability and antimicrobial activity. Food and Bioprocess Technology, 14, 2195–2206.

Liu, W., Wei, X., Wang, L., et al. (2025). Comparative metabolomic analysis of spray- and freeze-dried Cornus officinalis microcapsules reveals temperature-dependent flavonoid retention and optimal encapsulation conditions. Journal of Food Engineering.

Liu, W., et al. (2016). Oral bioavailability of curcumin : Problems and advancements. Journal of Drug Targeting, 24(8), 694–702.

Lopez, N., Puertolas, E., Condon, S., Raso, J., & Alvarez, I. (2009). Enhancement of the solid-liquid extraction of sucrose from sugar beet (Beta vulgaris) by pulsed electric fields. LWT – Food Science and Technology, 42(10), 1674–1680.

López, N., Puértolas, E., Condón, S., Álvarez, I., & Raso, J. (2008). Effects of pulsed electric fields on the extraction of phenolic compounds during the fermentation of must of Tempranillo grapes. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 9(4), 477–482.

Lukinac, J., Medaković, D., Koceva Komlenić, D., Šušak, A., & Jukić, M. (2026). Application of Quercus pubescens acorn flour and xanthan gum in gluten-free cookies : RSM optimization and quality evaluation. Foods, 15(3)..

Mahdi, N. K., Gany, Z. H., & Sharief, M. (2006). Alternative drugs against Trichomonas vaginalis. Eastern Mediterranean Health Journal, 12(5), 679–684.

Maheshwari, P., & Singh, U. (1965). Dictionary of economic plants of India. Indian Council of Agricultural Research.

Mahdavi, S. A., Jafari, S. M., Assadpour, E., & Dehnad, D. (2016). Microencapsulation optimization of natural anthocyanins with maltodextrin, gum Arabic and gelatin. International Journal of Biological Macromolecules, 85, 379–385.

Mancebo, C. M., Rodriguez, P., & Gómez, M. (2016). Assessing rice flour–starch–protein mixtures to produce gluten-free sugar-snap cookies. LWT – Food Science and Technology, 67, 127–132.

Mansouri, S., Foroumadi, A., Ghaneie, T., & Najar, A. G. (2001). Antibacterial activity of the crude extracts and fractionated constituents of Myrtus communis. Pharmaceutical Biology, 39(5), 399–401.

Marcelino, J. S., & Marcelino, M. S. (2012). Fabricação de bolachas e biscoitos (Dossiê Técnico). Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas, Instituto de Tecnologia do Paraná.

.MarketsandMarkets. (2021). *Gluten-free products market*.

Martin, T., et al. (1999). Polyphenolic compounds of myrtle. Pharmaceutical Biology, 37(1), 28–31.

Martinović, J., Lukinac, J., Jukić, M., Ambrus, R., Planinić, M., Šelo, G., Klarić, A., Perković, G., & Bucić Kojić, A. (2023). Physicochemical characterization and evaluation of gastrointestinal in

vitro behavior of alginate based microbeads with encapsulated grape pomace extracts. Pharmaceutics, 15(3), 880.

McClements, D. J., Decker, E. A., & Weiss, J. (2007). Emulsion-based delivery systems for lipophilic bioactive components. *Journal of Food Science, 72*(8), R109–R124.

Mechchate, H., de Castro Alves, C. E., Es-Safi, I., Amaghnouje, A., Jawhari, F., Oliveira, R. C., Gomes, A. F., Conte, R., Pontes, G. S., Bousta, D., & Grafov, A. (2022). Antileukemic, antioxidant, anti-inflammatory and healing activities induced by a polyphenol-enriched fraction extracted from leaves of Myrtus communis L. Nutrients, 14(23), 5055.

Medda, S., Fadda, A., Dessena, L., & Mulas, M. (2021). Quantification of total phenols, tannins, anthocyanins content in *Myrtus communis* L. and antioxidant activity evaluation in function of plant development stages and altitude of origin site. *Agronomy, 11*(6), 1059.

Mehta, N., Kumar, P., Verma, A. K., Umaraw, P., Kumar, Y., Malav, O. P., Sazili, A. Q., Domínguez, R., & Lorenzo, J. M. (2022). Microencapsulation as a noble technique for the application of bioactive compounds in the food industry : A comprehensive review. Applied Sciences, 12(3), 1424.

Melo, B. G., Tagliapietra, B. L., & Clerici, M. T. P. S. (2023). Evolution of the technological, sensory, and nutritional quality of gluten-free cookies : A critical review. Food Science and Technology, 43, e75822.

Mërtiri, I., Coman, G., Cotârleț, M., Turturică, M., Balan, D., Râpeanu, G., Stănciuc, N., & Mihalcea, L. (2025). Phytochemical profile screening and selected bioactivity of *Myrtus communis* berries extracts obtained from ultrasound-assisted and supercritical fluid extraction. *Separations, 12*(1), Article 10.

Milhau, G., Valentin, A., Benoit, F., Mallie, M., Bastide, J. M., Pellisier, Y., & Bessiere, J. M. (1997). In vitro antimalarial activity of 8 essential oils. Journal of Essential Oil Research, 9(3), 329–333.

Mimica-Dukic, N., Bugarin, D., Grbovic, S., Mitic-Culafic, D., Vukovic-Gacic, B., Orcic, D., Jovin, E., & Couladis, M. (2010). Essential oil of Myrtus communis L. as a potential antioxidant and antimutagenic agent. Molecules, 15(4), 2759–2770.

Mir, S. A., Bosco, S. J. D., Shah, M. A., Santhalakshmy, S., & Mir, M. M. (2017). Effect of apple pomace on quality characteristics of brown rice based cracker. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 16(1), 25–32.

Mir, S. A., Shah, M. A., Naik, H. R., & Zargar, I. A. (2016). Influence of hydrocolloids on dough handling and technological properties of gluten-free breads. Trends in Food Science & Technology, 51, 49–57.

Mokhtari, S., Jafari, S. M., Khomeiri, M., Maghsoudlou, Y., & Ghorbani, M. (2017). The cell wall compound of Saccharomyces cerevisiae as a novel wall material for encapsulation of probiotics. Food Research International, 96, 19–26.

Molinari, R., Costantini, L., Timperio, A. M., Lelli, V., Bonafaccia, F., Bonafaccia, G., & Merendino, N. (2018). Tartary buckwheat malt as ingredient of gluten-free cookies. Journal of Cereal Science, 80, 37–43.

Montoro, P., Tuberoso, C. L., Piacente, S., Perrone, A., De Feo, V., Cabras, P., & Pizza, C. (2006). Stability and antioxidant activity of polyphenols in extracts of Myrtus communis L. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 41(5), 1614–1619.

Morris, G., Winters, L., Coulson, G., & Clarke, K. (1986). Effect of osmotic stress on the ultrastructure and viability of the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *Microbiology, 132*(7), 2023–2034.

Mohammadi R, Esfahani S H M, Shadzi S and Moattar F, Antifungal activity of Myrtus communis L. esssential oil against clinical isolates of Aspergillus, J Isfahan Medical School, 2008, 26(89), 105-111.

Moura, D., Vilela, J., Saraiva, S., Monteiro-Silva, F., de Almeida, J. M. D., & Saraiva, C. (2023). Antimicrobial effects and antioxidant activity of *Myrtus communis* L. essential oil in beef stored under different packaging conditions. *Foods 12*(18), 3390.

Nadkarni, K. M. (1989). *Indian materia medica* (3rd ed., Vol. 1). Popular Prakashan Pvt. Ltd.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Naseer, B., Naik, H. R., Hussain, S. Z., Zargar, I., Beenish, Bhat, T. A., & Nazir, N. (2021). Effect of carboxymethyl cellulose and baking conditions on in-vitro starch digestibility and physico-textural characteristics of low glycemic index gluten-free rice cookies. *LWT, 141*, 110885.

Nelson, G. (2002). Application of microencapsulation in textiles. *International Journal of Pharmaceutics, 242*(1–2), 55–62.

Nguyen, T.-T., Phan-Thi, H., Pham-Hoang, B.-N., Ho, P.-T., Tran, T. T. T., & Waché, Y. (2018). Encapsulation of *Hibiscus sabdariffa* L. anthocyanins as natural colours in yeast. *Food Research International, 107*, 275–280.

Normand, V., Dardelle, G., Bouquerand, P.-E., Nicolas, L., & Johnston, D. J. (2005). Flavor encapsulation in yeasts: Limonene used as a model system for characterization of the release mechanism. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 53*(19), 7532–7543.

Nunes, M. C., Raymundo, A., Sousa, I., & Coimbra, M. A. (2017). Effect of cellular disruption on phenolic release and antioxidant properties in plant matrices. *Food Research International, 99*, 336–343.

Oancea, S. (2021). A review of the current knowledge of thermal stability of anthocyanins and approaches to their stabilization to heat. *Antioxidants, 10*(9), 1337.

Ola, E., & Seo, H.-S. (2025). Variations in sensory and emotional responses to gluten-containing and gluten-free cookie products under blind and labeled conditions. *Journal of Food Science, 90*(5), e70273.

Olawoye, B., & Gbadamosi, S. O. (2020). Sensory profiling and mapping of gluten-free cookies made from blends Cardaba banana flour and starch. *Journal of Food Processing and Preservation, 44*(9), e14643.

Oliveira, S. M., Gruppi, A., Vieira, M. V., Souza, G. M., Vicente, A. A., Teixeira, J. A., Fuciños, P., Spigno, G., & Pastrana, L. (2020). How additive manufacturing can boost the bioactivity of baked functional foods. *Journal of Food Engineering, 288*, 110149.

Ospina, M., Moreno, J. L., Tran, T., Jaramillo, A. M., Gallego, S., Ospina, B., & Dufour, D. (2023). Kinetics of thermal degradation of carotenoids related to potential of mixture of wheat, cassava and sweet potato flours in baking products. *Journal of the Science of Food and Agriculture, 103*(12), 5945–5957.

Paciulli, M., Rinaldi, M., Cavazza, A., Ganino, T., Rodolfi, M., Chiancone, B., & Chiavaro, E. (2018). Effect of chestnut flour supplementation on physico-chemical properties and oxidative stability of gluten-free biscuits during storage. *LWT, 98*, 451–457.

Paramera, E. I., Karathanos, V. T., & Konteles, S. J. (2014). Yeast cells and yeast-based materials for microencapsulation. In G. M. G. Gaonkar, N. Vasisht, A. R. Khare, & R. Sobel (Eds.), *Microencapsulation in the Food Industry* (pp. 267–281). Academic Press.

Paramera, E. I., Konteles, S. J., & Karathanos, V. T. (2011). Microencapsulation of curcumin in cells of *Saccharomyces cerevisiae*. *Food Chemistry, 125*(3), 892–902.

Paramithiotis, S. (2022). Microbial permeabilization for the release of intracellular proteins and other compounds. In *Advances in Microbial Biotechnology* (pp. 45–62). Springer.

Parapouli, M., Vasileiadis, A., Afendra, A.-S., & Hatziloukas, E. (2020). *Saccharomyces cerevisiae* and its industrial applications. *AIMS Microbiology, 6*(1), 1–31.

Paris, M., Ramírez-Corona, N., Palou, E., & López-Malo, A. (2020). Modelling release mechanisms of cinnamon (*Cinnamomum zeylanicum*) essential oil encapsulated in alginate beads during vapor-phase application. *Journal of Food Engineering, 282*, 110024.

Pasqualone, A., Bianco, A. M., Paradiso, V. M., Summo, C., Gambacorta, G., & Caponio, F. (2014). Physico-chemical, sensory and volatile profiles of functional gluten-free biscuits enriched with bioactive compounds. *Food Chemistry, 146*, 369–376.

Pateiro, M., Gómez, B., Munekata, P. E. S., Barba, F. J., Putnik, P., Kovačević, D. B., & Lorenzo, J. M. (2021). Nanoencapsulation of promising bioactive compounds to improve their absorption, stability, functionality and the appearance of the final food products. *Molecules, 26*(6), 1547.

Patras, A., Brunton, N. P., O'Donnell, C., & Tiwari, B. K. (2010). Effect of thermal processing on anthocyanin stability in foods: Mechanisms and kinetics of degradation. *Trends in Food Science & Technology, 21*(1), 3–11.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Pedisić, S., Dragović-Uzelac, V., Berraquero-García, C., Pérez-Gálvez, R., Espejo-Carpio, F. J., Guadix, A., Guadix, E. M., & García-Moreno, P. J. (2023). Encapsulation of bioactive peptides by spray-drying and electrospraying. *Foods, 12*(10), 2005.

Pérez-Pérez, V., Jiménez-Martínez, C., González-Escobar, J. L., & Corzo-Ríos, L. J. (2024). Exploring the impact of encapsulation on the stability and bioactivity of peptides extracted from botanical sources: Trends and opportunities. *Frontiers in Chemistry, 12*, 1423500.

Pham-Hoang, B. N., Voilley, A., & Waché, Y. (2016). Molecule structural factors influencing the loading of flavoring compounds in a natural-preformed capsule: Yeast cells. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 148*, 220–228.

Pham-Hoang, B. N., Romero-Guido, C., Phan-Thi, H., & Waché, Y. (2018). Strategies to improve carotene entry into cells of *Yarrowia lipolytica* in a goal of encapsulation. *Journal of Food Engineering, 224*, 88–94.

Polakof, S., Díaz-Rubio, M. E., Dardevet, D., Martin, J. F., Pujos-Guillot, E., Scalbert, A., Sebedio, J. L., Mazur, A., & Comte, B. (2013). Resistant starch intake partly restores metabolic and inflammatory alterations in the liver of high-fat-diet-fed rats. *Journal of Nutritional Biochemistry, 24*(11), 1920–1930.

Polat Yemiş, G., Sezer, E., & Sıçramaz, H. (2022). Inhibitory effect of sodium alginate nanoemulsion coating containing myrtle essential oil (*Myrtus communis* L.) on *Listeria monocytogenes* in Kasar cheese. *Molecules, 27*(21), 7298.

Puértolas, E., Luengo, E., Álvarez, I., & Raso, J. (2012). Improving mass transfer to soften tissues by pulsed electric fields: Fundamentals and applications. *Annual Review of Food Science and Technology, 3*, 263–282.

Puértolas, E., Cregenzán, O., Luengo, E., Álvarez, I., & Raso, J. (2013). Pulsed-electric-field-assisted extraction of anthocyanins from purple-fleshed potato. *Food Chemistry, 136*(3–4), 1330–1336.

Pulido-Moran, M., Moreno-Fernandez, J., Ramirez-Tortosa, C., & Ramirez-Tortosa, M. (2016). Curcumin and health. *Molecules, 21*(3), 264.

Radočaj, O., Dimić, E., & Tsao, R. (2014). Effects of hemp (*Cannabis sativa* L.) seed oil press-cake and decaffeinated green tea leaves (*Camellia sinensis*) on functional characteristics of gluten-free crackers. *Journal of Food Science, 79*(3), C318–C325.

Rashmi, S., & Urooj, A. (2003). Effect of processing on nutritionally important starch fractions in rice varieties. *International Journal of Food Sciences and Nutrition, 54*(1), 27–36.

Rastogi, R. P., & Mehrotra, B. N. (1991). *Compendium of Indian medicinal plants* (Vol. 2). CSIR.

Rastogi, R. P., & Mehrotra, B. N. (1993). *Compendium of Indian medicinal plants* (Vol. 3). CSIR.

Remígio, M. S. N., Greco, T., Silva Júnior, J. O. C., et al. (2024). Spray-drying microencapsulation of *Bauhinia ungulata* L. var. *obtusifolia* aqueous extract containing phenolic compounds: A comparative study using different wall materials. *Pharmaceutics, 16*, 488.

Rezagholizade-Shirvan, A., Soltani, M., Shokri, S., Radfar, R., Arab, M., & Shamloo, E. (2024). Bioactive compound encapsulation: Characteristics, applications in food systems, and implications for human health. *Food Chemistry X, 24*, 101953.

Robert, P., Gorena, T., Romero, N., Sepulveda, E., Chavez, J., & Saenz, C. (2010). Encapsulation of polyphenols and anthocyanins from pomegranate (*Punica granatum*) by spray drying. *International Journal of Food Science & Technology, 45*(7), 1386–1394.

Robertson, G. L. (2016). *Food packaging: Principles and practice* (3rd ed.). CRC Press.

Romani, A., Pinelli, P., Mulinacci, N., Vincieri, F. F., & Tattini, M. (1999). Identification and quantification of polyphenols in leaves of *Myrtus communis* L. *Chromatographia, 49*(1–2), 17–20.

Rosa, A., Melis, M. P., Deiana, M., Atzeri, A., Appendino, G., Corona, G., Incani, A., Loru, D., & Dessì, M. A. (2008). Protective effect of the oligomeric acylphloroglucinols from *Myrtus communis* on cholesterol and human low-density lipoprotein oxidation. *Chemistry and Physics of Lipids, 155*(1), 16–23.

Rosell, C. M., & Marco, C. (2008). Rice. In E. K. Arendt & F. Dal Bello (Eds.), *Gluten-free cereal products and beverages* (pp. 81–111). Academic Press.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ruiz-Rodriguez, A., Marín, F. R., Ocaña, A., & Soler-Rivas, C. (2008). Effect of domestic processing on bioactive compounds. *Phytochemistry Reviews, 7*(2), 345–384.

Sacchetti, G., et al. (2007). *Biodiversity of Italian myrtle*. *Natural Product Research, 21*(2), 167–179.

Saini, A., Panesar, P. S., & Bera, M. B. (2019). Comparative study on the extraction and quantification of polyphenols from citrus peels using maceration and ultrasonic technique. *Current Research in Nutrition and Food Science, 7*(3), 678–685.

Salehi, B., Machin, L., Monzote, L., Sharif-Rad, J., Ezzat, S. M., Salem, M. A., Merghany, R. M., El Mahdy, N. M., Kılıç, C. S., Sytar, O., & Sharif-Rad, M. (2020). Therapeutic potential of quercetin: New insights and perspectives for human health. *ACS Omega, 5*(20), 11849–11872.

Salihu, S., Gashi, N., & Hasani, E. (2023). Effect of plant extract addition on the physicochemical and sensory properties of biscuits. *Applied Sciences, 13*(5), 3012.

Sandhu, K. S., & Lim, S. T. (2008). Digestibility of legume starches as influenced by their physical and structural properties. *Carbohydrate Polymers, 71*(2), 245–252.

Satyavati, G. V., Raina, M. K., & Sharma, M. (Eds.). (1987). *Medicinal plants of India* (Vol. 2, pp. 310–311). Indian Council of Medical Research.

Schmiele, M., Sampaio, U. M., & Clerici, M. T. P. S. (2019). Basic principles: Composition and properties of starch. In *Starches for Food Application: Chemical, Technological and Health Properties* (pp. 1–22). Elsevier.

Sedej, I., Sakač, M., Mandić, A., Mišan, A., Pestorić, M., Šimurina, O., & Čanadanović-Brunet, J. (2011). Quality assessment of gluten-free crackers based on buckwheat flour. *LWT – Food Science and Technology, 44*(3), 694–699.

Semouma, D., Laib, I., Laib, D. E., Chenchouni, H., Rahmani, Y., Fekrache, F., Hadef, A., Bensouici, C., & Barkat, M. (2024). Microencapsulation of *Myrtus communis* extracts in *Saccharomyces cerevisiae* cells: Effects on phenolic content and antioxidant capacity, physical characterization and molecular docking analysis. *Food and Bioprocess Technology, 17*(10), 3281–3304.

Sepici, A., Gurbuz, I., Cevik, C., & Yesilada, E. (2004). Hypoglycaemic effects of myrtle oil in normal and alloxan-diabetic rabbits. *Journal of Ethnopharmacology, 93*(2–3), 311–318.

Serce, S., Ercisli, S., Sengul, M., Gunduz, K., & Orhan, E. (2010). Antioxidant activities and fatty acid composition of wild grown myrtle (*Myrtus communis* L.) fruits. *Pharmacognosy Magazine, 6*, 9–12.

Serio, A., Chaves-López, C., Martuscelli, M., Mazzarrino, G., Di Mattia, C., & Paparella, A. (2014). Application of Central Composite Design to evaluate the antilisterial activity of hydro-alcohol berry extract of *Myrtus communis* L. *LWT – Food Science and Technology, 58*(1), 116–123.

Serna-Saldivar, S. O., & Carrillo, E. P. (2018). Food uses of whole corn and dry-milled fractions. In *Corn: Chemistry and Technology* (3rd ed.). Elsevier.

Shi, G., Rao, L., Yu, H., Xiang, H., Yang, H., & Ji, R. (2008). Stabilization and encapsulation of photosensitive resveratrol within yeast cell. *International Journal of Pharmaceutics, 349*(1–2), 83–93.

Shi, G., et al. (2007). Yeast-cell-based microencapsulation of chlorogenic acid as a water-soluble antioxidant. *Journal of Food Engineering, 80*(4), 1060–1067.

Shishir, M. R. I., Xie, L., Sun, C., Zheng, X., & Chen, W. (2018). Advances in micro and nano-encapsulation of bioactive compounds using biopolymer and lipid-based transporters. *Trends in Food Science and Technology, 78*, 34-60.

Silva, D. W., Bolini, H. M. A., & Clerici, M. T. P. S. (2021). Gluten-free rice & bean biscuit: Characterization of a new food product. *Heliyon, 7*(1), e05956.

Singh, J., Dartois, A., & Kaur, L. (2010). Starch digestibility in food matrix: a review. *Trends in Food Science & Technology, 21*(4), 168-180.

Singh, P., Arora, A., Strand, T. A., Leffler, D. A., Catassi, C., Green, P. H. R., Kelly, C. P., Ahuja, V., & Makharia, G. K. (2018). Global prevalence of celiac disease: Systematic review and meta-analysis. *Clinical Gastroenterology and Hepatology, 16*(6), 823–836.e2.

Singla, R., Dubey, A., Garg, A., Sharma, R., Fiorino, M., Ameen, S., Haddad, M., & Al-Hiary, M. (2019). Natural polyphenols: Chemical classification, definition of classes, subcategories, and structures. *Journal of AOAC International, 102*(5), 1397–1403.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology, 299*, 152–178.

Snoussi, A., Bouacida, S., Mitić, M., Arsić, B., Ben Haj Koubaier, H., Chouaibi, M., Janković, S., Zlatanović, I., Mrmošanin, J., Stojanović, G., & Bouzouita, N. (2022). Thermal degradation kinetics of myrtle leaves ethanol extract (*Myrtus communis* L.): Effect on phenolic compounds content and antioxidant activity. *Journal of Food Measurement and Characterization, 16*(4), 2865–2876.

Snoussi, A., Essaidi, I., Ben Haj Koubaier, H., Zrelli, H., Alsafari, I. A., Živoslav, T., Mihailović, J., Khan, M., El Omri, A., Ćirković-Veličković, T., & Bouzouita, N. (2021). Drying methodology effect on the phenolic content, antioxidant activity of *Myrtus communis* L. leaves ethanol extracts and soybean oil oxidative stability. *Chemistry Central Journal, 15*, 56.

Soxhlet, F. (1879). *Die gewichtsanalytische Bestimmung des Milchfettes*. Polytechnisches Journal, 232, 461–465.

Spiller, G. A., Amen, R. J., & Kritchevsky, D. (1975). Dietary fiber in human nutrition. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 7*(1), 39–70.

Stuart, M. (1994). *The encyclopedia of herbs and herbalism* (3rd ed.). Crescent Books.

Sulieman, A. A., Zhu, K.-X., Peng, W., Hassan, H. A., Obadi, M., Siddeeg, A., & Liu, Y.-M. (2018). Rheological and quality characteristics of composite gluten-free dough and biscuits supplemented with fermented and unfermented *Agaricus bisporus* polysaccharide flour. *Food Chemistry, 271*, 193–203.

Sultana, A., Tanaka, Y., Fushimi, Y., & Yoshii, H. (2018). Stability and release behavior of encapsulated flavor from spray-dried *Saccharomyces cerevisiae* and maltodextrin powder. *Food Research International, 106*, 809–816.

Sumbul, S., Ahmad, M. A., Asif, M., Akhtar, M., & Saud, I. (2012). Physicochemical and phytochemical standardization of berries of Myrtus communis Linn. *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences*, *4*(4), 322-326.

Tahmouzi, S., Heydari-Majd, M., Daliri, H., Karimi, J., Zare, L., Meftahizadeh, H., & Meybodi, N. M. (2025). Impacts of plant-derived hydrocolloids on technological characteristics of gluten-free bakery products: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*.

Tan, C., Huang, M., McClements, D. J., Sun, B., & Wang, J. (2021). Yeast cell-derived delivery systems for bioactives. *Trends in Food Science & Technology, 116*, 474–489.

Tang, M., & Taghibiglou, C. (2017). The mechanisms of action of curcumin in Alzheimer's disease. *Journal of Alzheimer's Disease, 58*(4), 1003–1016.

Tapia, M. S., Alzamora, S. M., & Chirife, J. (2020). Effects of water activity (aw) on microbial stability as a hurdle in food preservation. Water activity in foods: Fundamentals and applications, 323-355).

Tarannum, R., Alam, A., Hasan, M., Rabby, G., Raiyan, A., Parvin, R., Alam, M., & Zahid, M. (2025). Development of oats flour and bitter gourd fortified cookies: Effects on physicochemical, antioxidant, antimicrobial, and sensory attributes. *PLoS ONE, 20*(3), e0316575.

Tijjani, H., Zangoma, M., Mohammed, Z., Obidola, S., Egbuna, C., & Abdulai, S. (2020). Polyphenols: Classifications, biosynthesis and bioactivities. In *Functional foods and nutraceuticals* (pp. 357–373). Springer.

Toepf, S., Heinz, V., & Knorr, D. (2007). High intensity pulsed electric fields applied for food preservation. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 46*(6), 537–546.

Torbica, A., Hadnadev, M., & Dapčević Hadnadev, T. (2012). Rice and buckwheat flour characterisation and its relation to cookie quality. *Food Research International, 48*(1), 277–283.

Traboulsi, A. F., Taoubi, K., El-Haj, S., Bessiere, J. M., & Rammal, S. (2002). Insecticidal properties of essential plant oils against the mosquito Culex pipiens molestus. Pest Management Science, 58(5), 491–495.

Trease, W., & Evans, D. (2006). Pharmacognosy (15th ed.). W.B. Saunders.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Tretiakova, I., Blaesius, D., Maxia, L., Wesselborg, S., Schulze-Osthoff, K., Cinatl, J., Jr., Michaelis, M., & Werz, O. (2008). Myrtucommulone from Myrtus communis induces apoptosis in cancer cells via the mitochondrial pathway involving caspase-9. Apoptosis, 13(1), 119–131.

Tsao, R. (2010). Chemistry and biochemistry of dietary polyphenols. Nutrients, 2(12), 1231–1246.

Tuberoso, C. I. G., Rosa, A., Bifulco, E., Melis, M. P., Atzeri, A., Pirisi, F. M., & Dessì, M. A. (2010). Chemical composition and antioxidant activities of Myrtus communis L. berries extracts. Food Chemistry, 123(4), 1242–1251.

Uysal, S., Sinan, K. I., & Zengin, G. (2023). Assessment of antioxidant and enzyme inhibition properties of Myrtus communis L. leaves. International Journal of Secondary Metabolite, 10(1), 56–67.

Valitutti, F., Iorfida, D., Anania, C., Trovato, C. M., Montuori, M., Cucchiara, S., & Catassi, C. (2017). Cereal consumption among subjects with celiac disease : A snapshot for nutritional considerations. Nutrients, 9(4), 396.

Waterhouse, A. L. (1999). Folin-Ciocalteu micro method for total phenol in wine. American Journal of Enology and Viticulture, 28(1), 49–55.

Worosz, M. R., & Wilson, N. L. W. (2012). A cautionary tale of purity, labeling and product literacy in the gluten-free market. Journal of Consumer Affairs, 46(2), 288–318.

Wu, T., Yu, X., Hu, A., Zhang, L., Jin, Y., & Abid, M. (2015). Ultrasonic disruption of yeast cells : Underlying mechanism and effects of processing parameters. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 28, 59–65.

Xiao, J. (2022). Recent advances on the stability of dietary polyphenols. *eFood*, *3*(3), e21.

Xu, J., Zhang, Y., Wang, W., & Li, Y. (2020). Advanced properties of gluten-free cookies, cakes, and crackers : A review. Trends in Food Science & Technology, 103, 200–213.

Xu, Y., Yan, X., Zheng, H., Li, J., Wu, X., Xu, J., Zhen, Z., & Du, C. (2024). The application of encapsulation technology in the food industry : Classifications, recent advances, and perspectives. Food Chemistry X, 24, 101240.

Yadegarinia, D., Gachkar, L., Rezaei, M. B., Astaneh, S. A., & Rasooli, I. (2006). Biochemical activities of essential oils. Phytochemistry, 67, 1249–1255.

Yiannikouris, A., & Jouany, J. P. (2002). Yeast cell wall components and their applications in food and feed systems. Biotechnology Letters, 24(12), 993–1000.

Young, S., Dea, S., & Nitin, N. (2017). Vacuum facilitated infusion of bioactives into yeast microcarriers : Evaluation of a novel encapsulation approach. Food Research International, 100, 100–112.

Young, S., & Nitin, N. (2019). Thermal and oxidative stability of curcumin encapsulated in yeast microcarriers. Food Chemistry, 275, 1–7.

Zade Ashkezary, E., Vazifedoost, M., Nateghi, L., Didar, Z., & Moslemi, M. (2024). Characterization of encapsulated riboflavin in plasmolyzed and non-plasmolyzed *Saccharomyces cerevisiae* yeast cells. *Journal of Food Measurement and Characterization*, *18*(2), 987–999.

Zagoskina, N., Zubova, M., Nechaeva, T., Kazantseva, V., Goncharuk, E., Katanskaya, V., Baranova, E., & Aksenova, M. (2023). Polyphenols in plants : Structure, biosynthesis, abiotic stress regulation, and practical applications (Review). International Journal of Molecular Sciences, 24(18), 13874.

Zahara, I. A., Ulfa, S. M., & Safitri, A. (2024). Comparative analysis of different natural polymers as coating agents for freeze-dried microencapsulation of Cosmos caudatus Kunth compounds. The Scientific World Journal, 2024, 6833341.

Zanetti, F., De Luca, G., & Sacchetti, R. (2010). Performance of a full-scale membrane bioreactor system in treating municipal wastewater for reuse purposes. *Bioresource technology*, *101*(10), 3768-3771

Annexe A : la corbe d'étalonnage de l'acide gallique

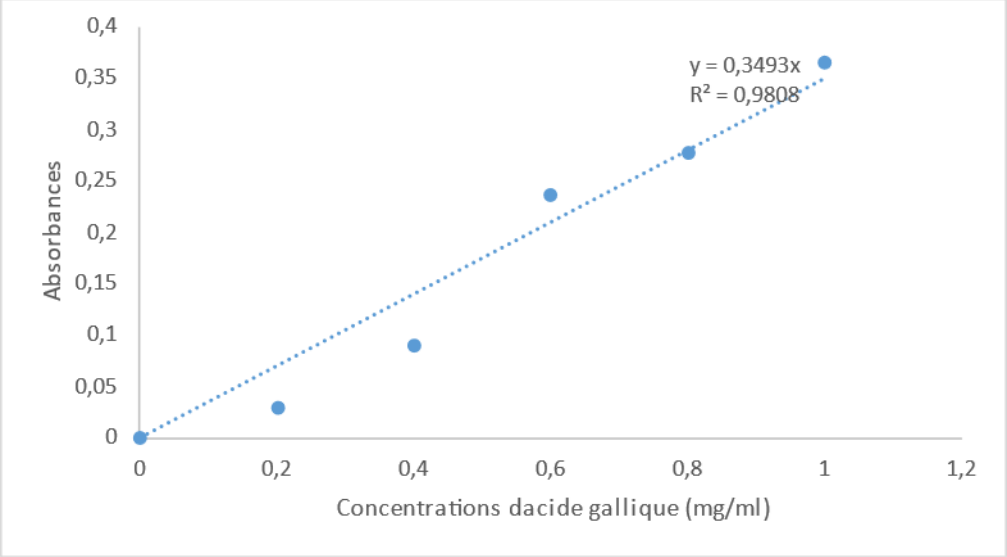


Figure 1 : Courbe d'étalonnage établie à partir de l'acide gallique.

Annexe B : la corbe d'étalonnage de la quercétine

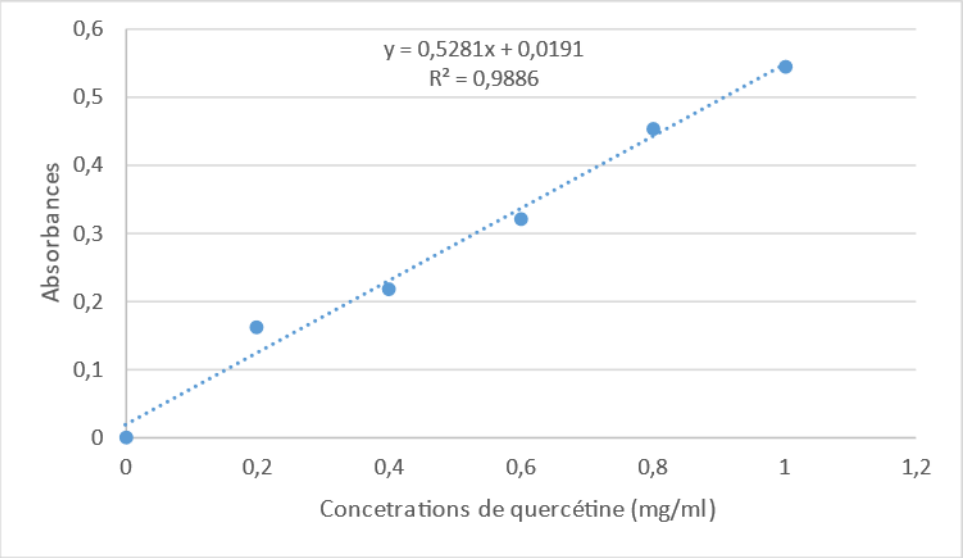


Figure 2 : Courbe d'étalonnage établie à partir de la quercétine

Annexe C : FICHE DE TEST HÉDONIQUE – COOKIES SANS GLUTEN

Nom : .....

Prénom : .....

Date : .....

Consommez-vous habituellement des produits sans gluten ? ☐ Oui ☐ Non

Instructions

Veuillez examiner et déguster attentivement chaque échantillon de cookies sans gluten. Attribuez une note de 1 à 9 selon votre niveau d'appréciation.

1	5	9
Je n'aime pas du tout	Neutre	J'aime extrêmement

Série 01

Attribut sensoriel	A	B	C
Apparence globale			
Couleur			
Croustillance			
Friabilité			
Dureté			
Adhésivité			
Arôme			
Goût global			

Série 02

Attribut sensoriel	A	B	C
Apparence globale			

Couleur			
Croustillance			
Friabilité			
Dureté			
Adhésivité			
Arôme			
Goût global			

Série 03

Attribut sensoriel	A	B	C
Apparence globale			
Couleur			
Croustillance			
Friabilité			
Dureté			
Adhésivité			
Arôme			
Goût global			

Série 04

Attribut sensoriel	A	B	C
Apparence globale			
Couleur			
Croustillance			
Friabilité			

Dureté			
Adhésivité			
Arôme			
Goût global			

Remarques du dégustateur

.....

.....

.....

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 1955 - سكيكدة
كلية العلوم
قسم علوم الفلاحة
رقم : / ق ع ف / 2026

Skikda le : 07/07/2026

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

Je soussigné(e) : Mme. Béchiri loubna Président(e) de Jury

Certifie que L'étudiant(e) : SENOUSSI Meriem

Spécialité : Agroalimentaire et qualité des produits

Intitulé : Encapsulation d'extrait de myrte (Myrtus communis) en vue de l'enrichissement nutritionnel de cookies sans gluten

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.

Directeur de mémoire	Président(e) de Jury
Dr. Imeu LAIB	

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RE'UBLIQUE 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 1955 - سكيكدة
كلية العلوم
قسم علوم الفلاحة
رقم : / ق ع ف / 2026

Skikda le : 07/07/2026

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

Je soussigné(e) : Mme. Béchiri loubna Président(e) de Jury

Certifie que L'étudiant(e) : SEDRATI Imene

Spécialité : Agroalimentaire et qualité des produits

Intitulé : Encapsulation d'extrait de myrte (Myrtus communis) en vue de l'enrichissement nutritionnel de cookies sans gluten

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.

Directeur de mémoire	Président(e) de Jury
Dr. Imen LAID	

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 1955- سكيكدة
كلية العلوم
قسم علوم الفلاحة
رقم : / ق ع ف / 2026

Skikda le : 07/07/2026

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

Je soussigné(e) : Mme. Béchiri loubna Président(e) de Jury

Certifie que L'étudiant(e) : GHOUIL Yousra

Spécialité : Agroalimentaire et qualité des produits

Intitulé : Encapsulation d'extrait de myrte (Myrtus communis) en vue de l'enrichissement nutritionnel de cookies sans gluten

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.

Directeur de mémoire	Président(e) de Jury
Dr. Imen Fitouh	

الجمـــهوريـة الجزائـــريـة الديمقراطية الشعبيـــة.

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 1955- سكيكدة
كلية العلوم
قسم علوم الفلاحة
رقم : / ق ع ف / 2026

Skikda le : 07/07/2026

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

Je soussigné(e) : Mme. Béchiri loubna Président(e) de Jury

Certifie que L'étudiant(e) : SAFSAF Malak

Spécialité : Agroalimentaire et qualité des produits

Intitulé : Encapsulation d'extrait de myrte (Myrtus communis) en vue de l'enrichissement nutritionnel de cookies sans gluten

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.

Directeur de mémoire	Président(e) de Jury
Dr. Imen LATB	