REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DE 20 AOÛT 1955 SKIKDA
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE

Master

Filière : sciences alimentaires

Spécialité : Agro-alimentaire et qualité des produits

Intitulé

Valorisation d'extraits de laurier (*Laurus nobilis*) encapsulés dans des viandes végétales sans gluten : approche technologique et fonctionnelle

présenté par :

- BEGGUOUR Bouchra
- BEN SADOUN Chaima
- BENDJAMA Salsabil

Membre de jury :

Djeffal Samia	Professeur	Présidente	Univ de 20 Août 1955-Skikda
Laib Imen	M.C.A	Promotrice	Univ de 20 Août 1955-Skikda
Boutata Fatima Zohra	M.C. B	Examinatrice	Univ de 20 Août 1955-Skikda

Année universitaire : 2025/2026

Remerciments

Nous remercions notre encadrante, Dr. Laib Imen, pour avoir accepté de nous encadrer et de nous guider. Nous lui exprimons notre profonde gratitude pour sa compréhension, ses encouragements ainsi que pour la confiance qu'elle nous a accordée tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements à tous les membres du jury pour avoir accepté d'examiner notre modeste travail.

Nous remercions tous nos enseignants du département d'agronomie qui nous ont éclairé le chemin du savoir et nous ont soutenues tout au long de notre parcours universitaire, sans oublier les ingénieurs de laboratoire.

Un grand merci à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire de fin d'études.

Ssou5975

Dédicace

الحمد لله رب العالمين في البدايات وفي النهايات الحمد والشكر لله عزّ وجلّ على منحي القوة والصبر والإرادة لإنجاز هذا العمل. الحمد لله على توفيقه ورحمته وهدايته فلولا توفيقه لما ننجز.

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents, mon père SAAD et ma mère DALILA, qui ont été ma source de motivation et de soutien inconditionnel. Leur amour, leurs sacrifices et leurs encouragements m'ont permis d'avancer et de réussir.

À mon cher frère Abd El-Moumen, ainsi qu'à mes chères sœurs Rahma et Hanane, qui ont toujours été un véritable pil ier dans ma vie, dans les moments faciles comme difficiles. À mes collègues de travail et chers amis intimes Salsabil & Chaima avec qui j'ai partagé les plus beaux moments de ce parcours.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à ma promotrice Imen Laib.

À tous mes professeurs, pour leur savoir, leur patience et leur contribution à ma formation de cette spécialité. Ainsi que tous ceux qui m'ont encouragée de près ou de loin.

À tous mes amies proches, ma famille.

Avec toute ma gratitude et mon profond respect.

Louange à Allah, pour mener à bien cette recherche scientifique.

Bouchra

Dédicace

Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous qui me sont chers

À Dieu le tout-puissant

Je remercie Dieu de m'avoir accordé la force, la patience et la volonté d'accomplir ce travail . Ma gratitude est infinie pour son innombrable bienfait et pour avoir guidé mes pas sur le chemin du savoir.

À moi-même

A celle qui n'a jamais abandonné, qui a cru en ces rêves malgré les nuits de fatigue et les moments de doutes. Je dédie ce succès à ma propre persévérance, en hommage à chaque effort fourni pour atteindre ce but.

À mon cher père, Med el-cherif

À celui qui m'a dit un jour que je suis la prunelle de ses yeux, et qui voyait dans mon plus simple succès la plus grande réalisation, à l'homme qui a fait de moi ce que je suis aujourd'hui car il est mon Père, celui dans les yeux duquel je vois la fierté de moi, mon model de respect et d'amour d'un père, de la compréhension et de la générosité. Grace à toi j'ai appris à être la fille qui ne cesse pas de faire tout pour te rendre heureux et fier.

À ma chère mère, Nabila

À celle dont ses paroles m'accompagnent depuis que j'étais petite, la première Femme Forte, courageuse qui a souffert sans nous laisser souffrir, celle qui m'a appris à être une fille forte et qui cherche toujours à achever ses objectifs à tout prix ; celle qui m'a encouragé à poursuivre mes rêves même les obstacles semblaient insurmontables. Mon ange gardien ton amour et ta présence dans ma vie et le fait d'être ma Mère continueront d'éclairer mon chemin.

À ma sœur karima et mon frère Rabah

Merci pour votre présence constante à mes côtés. Vous avez partagé mes inquiétudes comme mes joies, et m'avez encouragée tout au long de ce parcours. Vous êtes, tous deux, ma force et ma fierté.

À mon oncle

Je suis arrivée là ou tu voulais me voir, j'ai tenu ma promesse, ton souvenir continue de guider mes pas.

À mes binômes

Pour votre soutien, votre collaboration précieuse et les moments partagés tout au long de cette aventure. Merci pour votre patience, votre travail et votre esprit d'équipe. Et À mes amis Pour leur amitié sincère, leur écoute, leur bonne humeur et les souvenirs inoubliables que nous avons partagés. Vos encouragements et votre présence m'ont permis d'alléger les moments de stress.

chaima

Dédicace

Avant tout, toute Louange à Allah, "Al hamdoulilah", qui m'a permis d'arriver jusqu'ici, qui m'a donné la force, la patience et la santé pour mener à bien ce travail. Sans Sa Volonté et Sa Miséricorde, rien n'aurait été possible.

Je dédie ce travail, avec tout mon amour, A
mon cher père et à ma précieuse mère,
Piliers de ma vie, prières de mon cœur. Merci pour votre soutien et vos
encouragements, vos sacrifices silencieux, et cet amour pur qui m'a portée
jusqu'ici. Aucun mot ne peut traduire ce que je ressens…Dieu seul
pourra vous récompenser en vous accueillant dans son paradis.

A mes très chers frères et sœurs,
A tous les membres de ma grande famille, A
mes chers amis et à mes proches,
À tous ceux qui m'ont aidée de près ou de loin,
À mes chères binômes et amies,

Un merci tout particulier pour votre travail remarquable, votre rigueur, votre sens de l'organisation et votre patience.
Votre contribution a été précieuse et votre implication exemplaire. Je vous souhaite du fond du cœur beaucoup de réussites.

Salsabil

Résumé

Face à la demande d'aliments fonctionnels et de substituts végétaux à la viande, la microencapsulation des composés bioactifs de *Laurus nobilis* constitue une stratégie pour améliorer leur stabilité. Cette étude a évalué la microencapsulation de l'extrait de *Laurus nobilis* dans des cellules de *Saccharomyces cerevisiae* intactes et plasmolysées, puis son incorporation dans un analogue de viande végétale sans gluten afin d'en étudier les propriétés antioxydantes, nutritionnelles, physicochimiques et sensorielles. Les extraits hydroalcooliques ont été incorporés à 0,02 ; 0,03 et 0,05 % dans des formulations à base de haricots blancs, de lentilles et d'avoine. Les polyphénols totaux, les flavonoïdes, l'activité antioxydante (DPPH), ainsi que les caractéristiques nutritionnelles, physicochimiques et sensorielles ont été analysés. L'encapsulation a significativement amélioré la préservation des composés bioactifs. Les polyphénols totaux ont atteint 0,1323 ± 0,0022 mg EAG/g (cellules intactes) et 0,1064 ± 0,0128 mg EAG/g (cellules plasmolysées), contre 0,0301 ± 0,0013 mg EAG/g pour l'extrait libre. L'activité antioxydante a dépassé 89 %**,** contre 69,7 % pour l'extrait libre. Les extraits encapsulés ont également réduit les lipides de 16,87 à 9,65 g/100 g dans la formulation contenant 0,05 % d'extrait encapsulé dans des cellules plasmolysées, tout en améliorant la stabilité et l'acceptabilité sensorielle. Ces résultats montrent que la microencapsulation de l'extrait de *Laurus nobilis* dans des cellules de *Saccharomyces cerevisiae* est une approche efficace pour protéger les composés bioactifs et améliorer les propriétés nutritionnelles, antioxydantes et sensorielles d'un analogue de viande végétale sans gluten.

Mots-clés : *Laurus nobilis* ; composés phénoliques ; microencapsulation ; *Saccharomyces cerevisiae* ; analogue de viande végétale sans gluten ; activité antioxydante

Abstract

The growing demand for functional foods and plant-based meat alternatives has increased interest in the valorization of bioactive compounds from *Laurus nobilis*. However, polyphenols and flavonoids are highly sensitive to processing conditions, limiting their stability. This study investigated the microencapsulation of *Laurus nobilis* extract in intact and plasmolyzed *Saccharomyces cerevisiae* cells and its incorporation into a gluten-free plant-based meat analogue to evaluate its antioxidant, nutritional, physicochemical, and sensory properties.

Hydroalcoholic extracts were incorporated at 0.02, 0.03, and 0.05% into formulations based on white beans, lentils, and oats. Total polyphenols, flavonoids, antioxidant activity (DPPH), and nutritional, physicochemical, and sensory characteristics were evaluated. Microencapsulation significantly improved the preservation of bioactive compounds. Total polyphenol contents reached 0.1323 ± 0.0022 mg GAE/g in intact cells and 0.1064 ± 0.0128 mg GAE/g in plasmolyzed cells, compared with 0.0301 ± 0.0013 mg GAE/g for the free extract. Antioxidant activity exceeded 89%, compared with 69.7% for the free extract. Encapsulated extracts also reduced lipid content from 16.87 to 9.65 g/100 g in the formulation containing 0.05% extract encapsulated in plasmolyzed cells, while improving product stability and sensory acceptability. These findings demonstrate that microencapsulation of *Laurus nobilis* extract in *Saccharomyces cerevisiae* cells is an effective strategy for protecting bioactive compounds and enhancing the nutritional, antioxidant, and sensory properties of a gluten-free plant-based meat analogue.

Keywords: *Laurus nobilis*; phenolic compounds; microencapsulation; *Saccharomyces cerevisiae*; gluten-free plant-based meat analogue; antioxidant activity

الملخص

أدى الطلب المتزايد على الأغذية الوظيفية وبدائل اللحوم النباتية إلى زيادة الاهتمام بتثمين المركبات الحيوية المستخلصة من نبات الغار .(*Laurus nobilis*) إلا أن البوليفينولات والفلافونويدات تتميز بحساسيتها العالية لظروف المعالجة، مما يحد من ثباتها. هدفت هذه الدراسة إلى تغليف مستخلص الغار مجهريًا داخل خلايا الخميرة (*Saccharomyces cerevisiae*) السليمة والمُحلَّلة بلازموليًا، وإدماجه في بديل نباتي خالٍ من الغلوتين للحوم، بهدف تقييم خصائصه المضادة للأكسدة، والغذائية، والفيزيائية-الكيميائية، والحسية.

تم إدماج المستخلص الكحولي-المائي بتراكيز 0.02 و0.03 و0.05% في تركيبات معتمدة على الفاصولياء البيضاء والعدس والشوفان. وشملت التقييمات قياس محتوى البوليفينولات الكلية، والفلافونويدات، والنشاط المضاد للأكسدة(DPPH) ، إضافة إلى الخصائص الغذائية والفيزيائية-الكيميائية والحسية. أظهر التغليف المجهري تحسنًا ملحوظًا في الحفاظ على المركبات الحيوية، حيث بلغ محتوى البوليفينولات الكلية 0.1323 ± 0.0022 ملغ مكافئ حمض الغاليك/غ في الخلايا السليمة، و0.1064 ± 0.0128 ملغ مكافئ حمض الغاليك/غ في الخلايا المُحلَّلة بلازموليًا، مقارنةً بـ0.0301 ± 0.0013 ملغ مكافئ حمض الغاليك/غ للمستخلص الحر. كما تجاوزت القدرة المضادة للأكسدة 89%، مقابل 69.7% للمستخلص الحر. وأسهمت المستخلصات المغلفة أيضًا في خفض محتوى الدهون من 16.87 إلى 9.65 غ/100 غ في التركيبة المحتوية على 0.05% من المستخلص المغلف داخل الخلايا المُحلَّلة بلازموليًا، مع تحسين ثبات المنتج وقبوله الحسي.

الكلمات المفتاحية :الغار(*Laurus nobilis*) ؛ المركبات الفينولية؛ التغليف المجهري؛ خميرة *Saccharomyces cerevisiae*؛ بديل نباتي للحوم خالٍ من الغلوتين؛ النشاط المضاد للأكسدة.

Liste des figures

N	Titres des figures	Page
Figure 1	Aspect morphologique des différents organes de *L. nobilis*: rameau (A),fleurs(B),fruits(C)	5
Figure 2	Composés identifiés dans l'huile essentielle des feuilles de *L.nobilis*	8
Figure 3	Quelques flavonoïdes des feuilles de *L.nobilis*	9
Figure 4	Quelque sproanthocyanidines des feuilles de *L.nobilis*	10
Figure 5	Alcaloïdes des feuilles de *L.nobilis*	11
Figure 6	Matériauxd'enrobagecourammentutiliséspourl'encapsulationdes composés bioactifs dans les microcapsules	17
Figure 7	Typesdeméthodesd'encapsulationutiliséesdansl'industrie alimentaire	17
Figure 8	Structureschématiqued'unecellulede levure	20
Figure 9	Viande végétale (a)Structure intacte et étirée des analogues de viande avoine-pois après réhydratation(b)Fibres et pores observés au microscope électronique à balayage	29
Figure 10	Configuration de l'extrudeuse pour les produits analogues à la viande HZ1:Zonedechauffage1;HZ2:Zonedechauffage2;HZ3:Zonedechauffage3;HZ4:Zone de chauffage 4.	32
Figure 11	Arbredelaurier(photo originale).	37
Figure 12	Teneur en polyphénols totaux de l'extrait de *Laurus nobilis.*	48
Figure 13	Teneur en flavonoïdes totaux de l'extrait de *Laurus nobilis*	53
Figure 14	Effetdel'encapsulationsurl'activitéantioxydantedel'extraitde *Laurus nobilis*	57
Figure 15	Aspectvisueldes formulationsdeviandevégétale sans glutenenrichiesenextraitdelauriersousdifférentesformesetconcentrations (témoin, 0,02 %, 0,03 % et 0,05 %) : (A) extrait libre ; (B) extrait microencapsulédansdescellulesdelevureintactes;(C)extrait microencapsulé dans des cellules de levure plasmolysées	73
Figure 16	Profil sensoriel des différentes formulations de viande végétale sans glutenenrichiesenextraitdelauriersousformelibreetencapsuléedansdescellulesdelevureintactesetplasmolysées.	74

Listes des tableaux

N	Titres des tableaux	Page
Tableau 1	Classification botanique de *L. nobilis* L.	4
Tableau 2	Composition et valeur nutritionnelle des feuilles de *L.nobilis*(Ambrose *et al*., 2016).	7
Tableau 3	Ingrédients utilisés pour la formulation de la viande végétale.	40
Tableau 4	Effetdel'enrichissementparl'extraitlibreetlesextraitsencapsuléssur la teneur en polyphénols totaux des formulations étudiées.	50
Tableau 5	Teneur en flavonoïdes (mg EQ/g d'extrait sec) des formulations enrichies en extrait libre et en extraits encapsulés(cellules intactes et plasmolysées)	55
Tableau 6	Activitéantioxydante(inhibitionduradicalDPPH,%)desformulations de viande végétale sans gluten enrichies en extrait de laurier libre ou microencapsulé	59
Tableau 7	Effetdel'incorporationdel'extraitdelaurierlibreetencapsulédansdes cellulesdelevuresurlacompositionnutritionnelledelaviandevégétale sans gluten.	62
Tableau 8	Caractéristiques physicochimiques (activité de l'eau, pH, extrait sec soluble,humiditéetcendres)desformulationsdeviandevégétalesans gluten enrichies en extrait de laurier libre et encapsulé à différentes concentrations	67

Listes des abréviations

Symboles	Definition
m	Mètre
cm	Centimètre
mm	Millimètre
Ph	Potentielhydrogène
g	Gramme
Kcal	KilocalorieUnitéénergétique
mg	Milli gramme
Cu	Cuivre
Zn	Zinc
Se	Sélénium
µg	Microgramme
UI	UnitéInternationale
ROS	Espècesréactivesdel'oxygène
ADN	Acidedésoxyribonucléique
CPG-SM	Chromatographieenphasegazeusecoupléeàla spectrométrie de masse
t	Tonne
an	Année
ml	Millilitre
BHA	Butylhydroxyanisole
BHT	Butylhydroxytoluène
CI_{50}	Concentrationinhibitrice50%
j	Jour
kg	Kilogramme
LDL	Lipoprotéinesdebassedensité
HDL	Lipoprotéinesdehautedensité
Trp-P-2	Tryptophanepyrolysat-2
CMI	Concentrationminimaleinhibitrice
MTT	Testdeviabilitécellulaire MTT
CMF	Concentrationminimalefongicide

SARS-CoV	Coronavirusdusyndromerespiratoireaigusévère
HSV-1	HerpèsSimplexVirustype1
ORL	Oto-rhino-laryngologie
RD50	Doserépulsive50 %
LC50	Concentrationlétale50 %
cm^2	Centimètrecarré
l	Litre
µm	Micromètre
GIT	GastrointestinalTract(tubedigestif)
GRAS	GenerallyRecognizedAsSafe
°C	DegréCelsius
nm	Nanomètre
Da	Dalton
KA01	Codedesouchede levure.
rpm	Toursparminute
Na Cl	Chloruredesodium
h	Heure
kg^{-1}	Parkilogramme
M	Molarité
EQ	Equivalentdequercétine
DPPH	2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle
tr	Tour
TPC	TotalPhenolicContent
TFC	TotalFlavonoidContent
°Brix	Degrédebrix
AOAC	AssociationofOfficialAnalytical Chemists
aw	Activitédel'eau
H %	Humidité
H_2SO_4	Acidesulfurique
NaOH	Hydroxydede sodium
HCl	Acidechlorhydrique
N	Normalité

p	Valeurdeprobabilité(teststatistique)
n	Nombred'échantillons
ET	Ecarttype
K	Potassium
Ca	Calcium
Mg	Magnesium
P	phosphore

Sommaire

Resumé
Listes des figures
Listes des
tableaux Listes
desabréviations
Introduction générale 1

Chapitre1:Laurier *Laurus nobilis*

1. Généralités 3
2. Étude botanique 3
2.1. Origine 3
2.2. Classification botanique 4
2.3. Description botanique 4
4. Distribution géographique 5
5. Récolte des feuilles 5
5.1. Séchage des feuilles 5
6. Composition et valeur nutritionnelle 6
6.1. Composé bioactif des feuilles de *L.nobilis* 7
6.1.1. Huiles essentielles 7
6.1.2Composésphénoliques 8
6.1.3. Flavonoïdes 9
6.1.4. Proanthocyanidines 10
6.1.5. Autres composés phénoliques 10
6.2. Alcaloïdes 10
7. Utilisation traditionnelles et effets thérapeutiques 11
7.1. Usages médicinaux 11
7.2. Utilisations culinaires 12
7.3. Utilisations cosmétiques 12
7.4. Utilisations pharmacologiques 12
7.4.1. Activité antioxydante 12
7.4.2. Activité antidiabétique 13
7.4.3Activitéantihyperlipidémique 13
7.4.4. Activité hépatoprotectrice 13
7.4.5Activitéantimutagène 14
7.4.6Activitéanticonvulsivante 14
7.4.7Activitéimmunostimulante 14
7.4.8. Activités analgésiques et anti-inflammatoires 14
7.4.9Activitécicatrisante 14
7.4.10Activitéantibactérienne 14

7.4.11Activitéfongicide 15

7.4.12. Activité antivirale 15

7.4.13. Activité insecticide..... 15

Chapitre2:Microencapsulation

1. Généralités 16

2. MatériauxdʼencapsulationCourammentUtilisésDansl'industrieAlimentaire 16

3. Méthodesd'encapsulationcourammentutiliséesdansl'industriealimentaire 17

3.1. Séchage par atomisation 18

3.2. Extrusion 18

3.3. Coacervation 18

4. Cellules de levure comme matériau d'encapsulation..... 19

4.1. Paroi cellulaire..... 20

4.2. Membrane plasmique..... 21

5. Prétraitements avant encapsulation des levures..... 21

5.1. Autolyse..... 21

5.2. Plasmolyse 22

6. Aspects de qualité des microcapsules de cellules de levure 22

6.1. Stabilité photochimique et oxydative 22

6.2. Stabilité thermique 23

6.3. Libération in vitro et ciblage du cœur 23

6.4. Portée commerciale et impact sensoriel 24

Chapitre3:Analogues de viande d'origine végétale

1. Généralités..... 26

2. Matériaux utilisés pour la viande végétale 26

2.1. Protéines..... 27

2.1.1Protéinesdesoja..... 27

2.1.2Protéinesdelégumineuses..... 28

2.1.3Protéinesdegrainesoléagineuses..... 29

2.2. Huiles et matières grasses 29

2.3. Agents liants..... 30

2.4. Exhausteurs de goût et d'arôme..... 30

2.5. Agents colorants..... 31

3. Formation d'analogues de viande par extrusion à haute teneur en humidité 31

4. Préférence des consommateurs pour les alternative à la viande à base de plantes…..... 32

5. Défis et opportunités dans les alternatives à la viande à base de plantes..... 33

5.1. Propriétés liées aux attributs sensoriels 34

6. Recherches futures et conclusion 35

Matériel et méthodes

1. Microencapsulation des composés phénoliques de *Laurus nobilis*... 37

1.1. Matériel végétal 37

1.1.1. Extraction de *Laurus nobilis* 37
1.1.2. Culture de la souche de *Saccharomyces cereviae* 37
1.1.3. Plasmolyse des souches de levures 38
1.1.4. Microencapsulation des composés phénoliques 38

2. Quantification des composés phénoliques 38
2.1. Dosage des polyphénols totaux… 38
2.2. Dosage des flavonoïdes 39
3. Évaluation de l'activité antioxydante par la méthode du DPPH 39
4. Formulation de la viande végétale sans gluten 39
4.1. Les ingrédients 39
4.2. Production des analogues de viande 41
4.3. Quantificationdescomposésphénoliquesetévaluationdel'activitéantioxydante 42
4.4. Détermination de la teneur en polyphénols totaux(TPC) 42
4.5. Détermination de la teneur en flavonoïdes totaux(TFC) 42
4.6. Activité antioxydante 42
5. Analyse physico-chimique 42
5.1. Activité de l'eau (aw) 42
5.2. pH 43
5.3. Extrait sec soluble(°Brix) 43
5.4Humidité (H%) 43
5.5Lateneurencendres 43
6. Analyse des propriétés nutritionnelles 44
6.1. Teneur en protéines… 44
6.2. Teneur en lipides 45
6.3. Teneur en glucides 46
6.4. Valeur calorique 46
6.5. Analyse Sensorielle 46
7. Analyse Statistique 47

Résultats et discussion

1. Teneurs en polyphénols totaux 48
1.1. Effet de l'encapsulation sur la teneur en polyphénols totaux de *Laurus nobilis*… 48
1.2. Effet de l'enrichissement des viandes végétales en extraits libres et en capsulés de *laurus nobilis* sur la teneur en polyphénols totaux 50
2. Teneur en flavonoïdes 53
2.1. Effet de l'encapsulation sur la teneur en flavonoïdes totaux de *Laurus nobilis.* 53
2.2. Effet de l'enrichissement des viandes végétales en extraits libres et en capsulés de *laurus nobilis* sur la teneur en flavonoïdes 55
3. Activité antioxydante 57
3.1. Effet de l'encapsulation sur l'activité antioxydante de l'extrait de Laurus nobilis. 57
3.2. Effet de l'enrichissement des viandes végétales en extraits libres et encapsulés de *laurus nobilis* sur l'activité antioxydante 58
4. Paramètres nutritionnels 61

4.1. Teneur en protéine 63
4.2. Teneur en lipide 64
4.3. Teneur en glucide 65
4.4. Valeur énergétique 66
5.. Paramètres physicochimiques 61
5.1Activitédel'eau (aw) 68
5.2. pH 69
5.3Extraitsecsoluble (°Brix) 70
5.4. Humidité 71
5.5. Teneur en cendres 72

6. Les attributs sensoriels 73
Conclusion 78
Références bibliographiques 80
Annexes

Introduction

Au cours des dernières décennies, l'intérêt pour les aliments fonctionnels et les ingrédients naturels s'est considérablement accru. Cette dynamique est principalement portée par une sensibilisation croissante des consommateurs aux relations entre alimentation et santé, ainsi que par la demande de produits capables d'apporter des bénéfices physiologiques au-delà de leur simple apport nutritionnel. Dans cette perspective, les plantes aromatiques et médicinales constituent une source particulièrement prometteuse de composés bioactifs dotés de propriétés antioxydantes, antimicrobiennes et thérapeutiques, susceptibles d'être valorisés dans les systèmes alimentaires modernes (Grigore-Gurgu *et al.,* 2025).

Parmi ces ressources végétales, *Laurus nobilis* L. (laurier noble) occupe une place importante en raison de sa richesse en huiles essentielles, composés phénoliques, flavonoïdes, tanins et autres métabolites secondaires. De nombreuses études ont mis en évidence les activités biologiques remarquables de cette espèce, notamment ses effets antioxydants, antibactériens, antifongiques, anti-inflammatoires et antidiabétiques. Ces propriétés confèrent au laurier un potentiel élevé pour le développement de formulations alimentaires enrichies et de produits à haute valeur fonctionnelle. (Jaradat *et al.,* 2024). Cependant, l'incorporation directe des extraits végétaux dans les matrices alimentaires demeure limitée par leur sensibilité aux facteurs environnementaux tels que l'oxydation, la lumière, la température et les interactions avec les constituants de la matrice. Ces contraintes peuvent induire une dégradation des molécules bioactives, réduire leur efficacité biologique et altérer les propriétés organoleptiques du produit final. Dans ce cadre, la microencapsulation apparaît comme une stratégie technologique pertinente permettant d'améliorer la stabilité des composés actifs, de les protéger contre les conditions défavorables et de moduler leur libération au sein des aliments (Mehta *et al.,* 2022). Parmi les systèmes de microencapsulation développés dans l'industrie agroalimentaire, les cellules de levure *Saccharomyces cerevisiae* suscitent un intérêt croissant en raison de leur caractère naturel, de leur innocuité, de leur faible coût et de leur capacité à agir comme micro-réservoirs de molécules bioactives. Les cellules intactes et plasmolysées offrent ainsi une protection efficace des substances encapsulées et peuvent améliorer leur stabilité au cours du stockage et des procédés de transformation (Dadkhodazade *et al.,* 2021).

Parallèlement, le marché des analogues de viande d'origine végétale connaît une expansion rapide à l'échelle mondiale. Cette croissance est stimulée par les préoccupations environnementales associées à l'élevage intensif, la recherche d'alternatives durables aux protéines animales ainsi que l'augmentation du nombre de consommateurs végétariens, végétaliens et flexitariens. Les analogues de viande végétale présentent plusieurs avantages nutritionnels et sanitaires, notamment une teneur réduite en graisse Saturées et en cholestérol,

une richesse en protéines végétales, fibres alimentaires et composés bioactifs, ainsi qu'un impact environnemental généralement inférieur à celui de la viande conventionnelle. Dans ce contexte, les formulations sans gluten suscitent un intérêt particulier, car elles répondent non seulement aux besoins des personnes atteintes de maladie cœliaque ou d'intolérance au gluten, mais également à ceux souffrant de certaines pathologies métaboliques, telles que l'hyperuricémie ou la goutte, pour lesquelles une réduction de la consommation de viande peut être bénéfique. Elles répondent également à une demande croissante pour des aliments perçus comme plus digestes et mieux adaptés à des régimes alimentaires spécifiques. Toutefois, le développement d'analogues de viande végétale sans gluten constitue un défi technologique majeur en raison de l'absence du réseau viscoélastique conféré par le gluten, élément essentiel à la structuration, à la cohésion et aux propriétés texturales de nombreuses matrices alimentaires (Andreani *et al.,* 2023).

Dans ce contexte, l'association d'un extrait bioactif de *Laurus nobilis,* de systèmes naturels de microencapsulation basés sur des cellules de levure intactes et plasmolysées, et d'une matrice innovante d'analogue de viande végétale sans gluten constitue une approche prometteuse pour le développement d'aliments fonctionnels à haute valeur ajoutée. Malgré le potentiel de ces approches, les données relatives à l'incorporation d'extraits de *Laurus nobilis* microencapsulés dans des analogues carnés végétaux sans gluten restent limitées.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'intérêt de la microencapsulation de l'extrait de Laurus nobilis dans des cellules de *Saccharomyces cerevisiae* intactes et plasmolysées, puis d'évaluer l'effet de son incorporation dans différentes formulations d'analogues de viande végétale sans gluten. Cette étude vise également à caractériser les extraits et les microcapsules obtenues, à comparer l'efficacité des deux systèmes d'encapsulation et à déterminer leur influence sur les propriétés physicochimiques, antioxydantes, microbiologiques et sensorielles des produits développés.

Ce mémoire est structuré en trois parties principales. La première est consacrée à une synthèse bibliographique portant sur *Laurus nobilis*, les techniques de microencapsulation utilisant les cellules de levure et les analogues de viande végétale sans gluten. La deuxième partie décrit les matériels et méthodes expérimentaux mis en œuvre. Enfin, la troisième partie présente les résultats obtenus et leur discussion

Partie bibliographique

Chapitre 1 : Laurier
Laurus nobilis

1.Généralités

L'utilisation thérapeutique des plantes est en constante expansion, bien que de nombreux aspects restent à explorer malgré l'abondance des recherches (Ahmad *et al.,* 2022 ; Barroso *et al.*, 2018 ; Elefe, 2021). Outre leur valeur nutritionnelle, les plantes produisent des composés bioactifs aux effets préventifs, largement exploités dans les industries pharmaceutique, alimentaire et cosmétique (Ambrose *et al.,* 2016 ; Yasin *et al.,* 2020).

Les condiments tels que *L. nobilis* sont appréciés pour leurs propriétés aromatiques et nservatrices, liées à leurs activités antioxydantes et antimicrobiennes (Morais *et al*., 2009). Cette espèce aromatique, utilisée en médecine traditionnelle, connaît un regain d'intérêt industriel, entraînant une augmentation de sa production mondiale (Chaaben*et al*., 2015).

L. nobilis (Lauraceae) est un arbre sempervirent méditerranéen utilisé depuis des siècles en alimentation, en médecine et en parfumerie (Hanif *et al.*, 2020). Ses feuilles, fraîches ou sèches, fournissent des huiles essentielles aux applications variées. Des études pharmacologiques ont mis en évidence des activités antimicrobiennes, antioxydantes, anticancéreuses, insecticides et antifongiques (Bendjersi*et al.,* 2016 ; Nabila *et al.,* 2022 ; Zibi*et al.,* 2022). Il est cultivé dans plusieurs pays, notamment en Algérie, en Türkiye, au Maroc et en Europe méditerranéenne (Guenane*et al.,* 2016).

Largement étudié, *L. nobilis* présente une grande diversité de composés phytochimiques et de propriétés thérapeutiques, avec des applications dans les affections neurologiques, dermatologiques, urologiques et gastro-intestinales (Caputo *et al*., 2017 ; Chahal*et al.,* 2017 ; Khaled Khodja *et al.,* 2021). Ce chapitre se concentre sur sa composition phytochimique et ses usages traditionnels.

2.Étude botanique

2.1. Origine

Laurus nobilis est originaire du bassin méditerranéen (Buto *et al*., 1990). Dès l'Antiquité, il était utilisé par les Grecs et les Romains comme condiment et plante médicinale, avec une forte valeur symbolique (couronne de laurier) (Ballabio & Goetz, 2010).

Étymologiquement, *Laurus* dérive de « laureola » (couronne), et « baccalauréat » de baccalauri (baie de laurier). Diffusé en Europe par les Romains puis introduit dans le Nouveau Monde, il est cultivé dans le bassin méditerranéen, en Russie, en Amérique centrale et au sud des États-Unis (Elzebroek& Wind, 2008).

2.2. Classification botanique

Laurus nobilis L. (Lauracées), appelé laurier-sauce, appartient à l'ordre des Laurales, comprenant 9 familles et 3000 espèces, dont les Lauraceae, Calycanthaceae et Monimiaceae. Les Lauracées regroupent >55 genres et 2500–3500 espèces (Trofimov*et al*., 2022).

Le genre *Laurus*inclut principalement *L. azorica* (= *L. canariensis*), *L. nobilis* (méditerranéen) et *L. novocanariensis* (Madère, Canaries, Maroc) (Ballabio & Goetz, 2010).

La classification détaillée est présentée dans **le tableau 1**.

Tableau 1. Classification botanique de *L. nobilis* L. (Quézel& Santa, 1962).

Régne	Plantae
Sous régne	Plantes vasculaires
Embranchement	Spermaphytes
Sous embranchement	Angiospermes
Classe	Dicotylédones
Sous classe	Magnolidées
Ordre	Laurales
Famille	Lauracées
Genre	*Laurus*
Espèce	*L. nobilis L.*

2.3. Description botanique

Laurus nobilis L. (laurier noble) est un arbuste ou un arbre sempervirent pouvant atteindre jusqu'à 12 m de hauteur à l'état naturel, mais généralement maintenu entre 2 et 3 m en culture. Il présente fréquemment plusieurs troncs et une écorce de couleur brun foncé à noire (Elzebroek et Wind, 2008). Les feuilles sont persistantes, lancéolées, mesurant environ 3 à 5 cm de largeur et jusqu'à 10 cm de longueur. Elles possèdent un apex aigu, un pétiole court et un limbe coriace à bords légèrement ondulés. Initialement pubescentes, elles deviennent progressivement glabres et présentent une surface brillante à maturité (Geerts *et al.,* 2002).

Espèce dioïque, L. nobilis fleurit généralement entre mars et mai. Les fleurs, petites, de couleur blanc crème à verdâtre, sont regroupées en ombelles axillaires de quatre à cinq unités. Elles sont dimères et composées de tépales disposés en deux verticilles.

Le fruit est une drupe ovoïde de 10 à 15 mm de diamètre, verte lorsqu'elle est immature puis noir violacé à maturité. Il renferme une graine riche en lipides. Le péricarpe et le mésocarpe représentent environ 36 % du poids du fruit, tandis que l'endocarpe et la graine en constituent

près de 64 %. Les baies persistent souvent sur l'arbre jusqu'au printemps suivant (Ballabio et Goetz, 2010) (Figure 1).

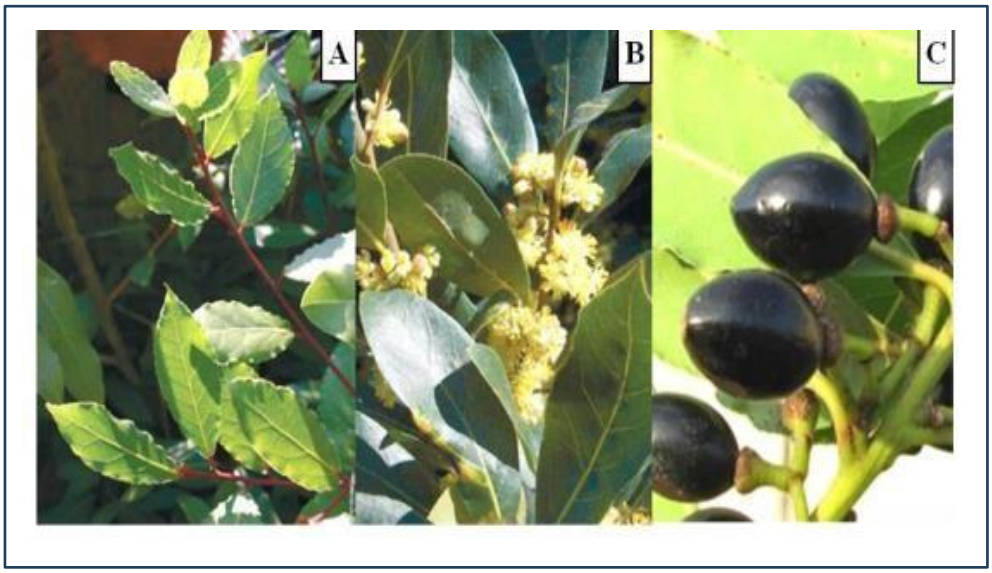


Figure 1. Aspect morphologique des différents organes de *L. nobilis* : rameau (A), fleurs (B), fruits (C) (Chaaben *et al*., 2015 ; Elzebroek & Wind, 2008).

4. Distribution géographique

Laurus nobilis L. se développe dans des conditions variées, avec une croissance optimale sur sols bien drainés, humides (pH 4,5–8,2) et en milieux atmosphériques humides, notamment côtiers (Kemp, 1983 ; Patrakar *et al*., 2012).Sa culture est largement répandue, surtout dans le bassin méditerranéen (Turquie, Algérie, Maroc, Portugal, France, Espagne, Grèce), ainsi qu'en Asie (Inde, Pakistan, Asie du Sud-Est), dans le Pacifique, en Australie, en Amérique centrale, au Mexique, au sud des États-Unis et aux îles Canaries (Parthasarathy *et al*., 2008).

5. Récolte des feuilles

Les feuilles de *Laurusnobilis L.,* persistantes, peuvent être récoltées toute l'année, avec une période optimale en automne en région méditerranéenne. La récolte a lieu entre juillet–août (Maroc, Portugal) et août–octobre (Turquie, Grèce, ex-Yougoslavie).

Elle doit être réalisée en conditions sèches (sans rosée ni pluie) afin d'éviter la dégradation et la décoloration des feuilles. La cueillette est généralement manuelle ou réalisée à l'aide d'outils simples (Ambrose *et al.*, 2016).

5.1.Séchage des feuilles

Le séchage est une méthode de conservation visant à éliminer l'eau libre afin de limiter la croissance microbienne et les réactions chimiques et enzymatiques (Cantín*et al*., 2011). Il facilite la gestion de la production et assure la disponibilité annuelle.

La forte teneur en eau des feuilles fraîches favorise leur altération. La déshydratation améliore leur stabilité, leur transport et préserve leurs qualités organoleptiques (Ouafi *et al*., 2015).

Après récolte, les feuilles sont lavées puis séchées jusqu'à une humidité <10 %, assurant leur stabilité au stockage (Ambrose *et al*., 2016 ; Díaz-Maroto *et al*., 2002).

Le séchage peut être réalisé au soleil, à l'ombre, par air chaud ou via des séchoirs. Le séchage solaire, bien qu'économique, peut altérer la couleur, tandis que les hautes températures entraînent des pertes en composés volatils. Ainsi, le séchage à l'ombre ou contrôlé est préférable (Ambrose *et al*., 2016

; Cakmak *et al*., 2013 ; Sellami *et al*., 2011).

Le séchage à air chaud réduit le temps de traitement. Des techniques récentes (four, micro-ondes) améliorent la qualité microbiologique tout en optimisant l'efficacité énergétique (Cakmak*et al*., 2013 ; Díaz-Maroto*et al*., 2002 ; Kuzgunkaya & Hepbasli, 2007 ; Sellami *et al*., 2011).

6. Composition et valeur nutritionnelle

Les feuilles de laurier présentent une saveur amère et un arôme caractéristique lié à leur richesse en huiles essentielles (Sumono &Sd, 2008). Leur teneur en eau est d'environ 50 % à l'état frais (Cakmak *et al*., 2013) et de 5 à 10 % après séchage. Les feuilles sèches contiennent 65 % de glucides, 8–11 % de protéines, 5–9 % de lipides et 4 % de cendres ; l'huile essentielle compte plus de 140 constituants (Elzebroek & Wind, 2008).

Parmi les composés identifiés figurent des sucres (fructose, saccharose, glucose, tréhalose), des polysaccharides (alginate, fucoïdane, laminarane), des acides organiques (oxalique, malique, ascorbique) et des acides gras, principalement palmitique puis linoléique (Alejo-Armijo *et al*., 2017).

Quatre tocophérols (α, β, γ, δ) ont été détectés : α et γ prédominent dans les feuilles, β dans les graines, δ étant le moins abondant (Chahal *et al*., 2017). Le **tableau 2** résume la composition nutritionnelle des feuilles de *L. nobilis*.

Tableau 2. Composition et valeur nutritionnelle des feuilles de *L. nobilis* (Ambrose *et al*., 2016).

Constituant	**Valeur pour 100g de matière**
Eau (g)	5,44
Energie (Kcal)	313
Protéines (g)	7,61
Glucides (g)	74,96
Cendres (g)	3,62
Lipides (g)	8,36
Acides gras saturés totaux (g)	2,28
Acides gras monoinsaturés totaux (g)	1,64
Acides gras polyinsaturés totaux (g)	2,29
Calcium (mg)	834
Fer (mg)	43
Magnésium (mg)	120
Phosphore (mg)	113
Potassium (mg)	529
Sodium (mg)	23
Zinc (mg)	3,70
Folates (µg)	180
Niacine (mg)	2,005
Riboflavine (mg)	0,421
Thiamine (mg)	0,009
Vitamine A. UI (UI)	6185
Vitamine A (mg)	309
Vitamine B (mg)	1,740
Vitamine C (mg)	46,6
Vitamine E (mg)	139

6.1.Composé bioactif des feuilles de *L.nobilis*

6.1.1. Huiles essentielles

L'analyse par CPG-SM de l'huile essentielle des feuilles de laurier a révélé plus de 150 composés, dont le 1,8-cinéole est majoritaire, accompagné d'α-pinène, β-pinène, sabinène,

limonène et linalol **(Figure 2)** (Chahal *et al*., 2017). D'autres organes (fruits, graines, fleurs, tiges, écorce) ont été moins étudiés ; leurs huiles essentielles contiennent principalement du 1,8-cinéole (26–51 %), de l'acétate d'α-terpinyle (5–14 %) et de l'α-pinène (4–6 %) (Chalchat *et al*., 2011). L'eugénol (11–12 %), le méthyl-eugénol (9–12 %) et l'élémicine (1–12 %) contribuent à l'arôme épicé et à la qualité des feuilles (Hanif *et al*., 2020). Cette huile essentielle est également utilisée comme conservateur alimentaire, notamment dans les huiles de table (Ordoudi *et al*., 2022).

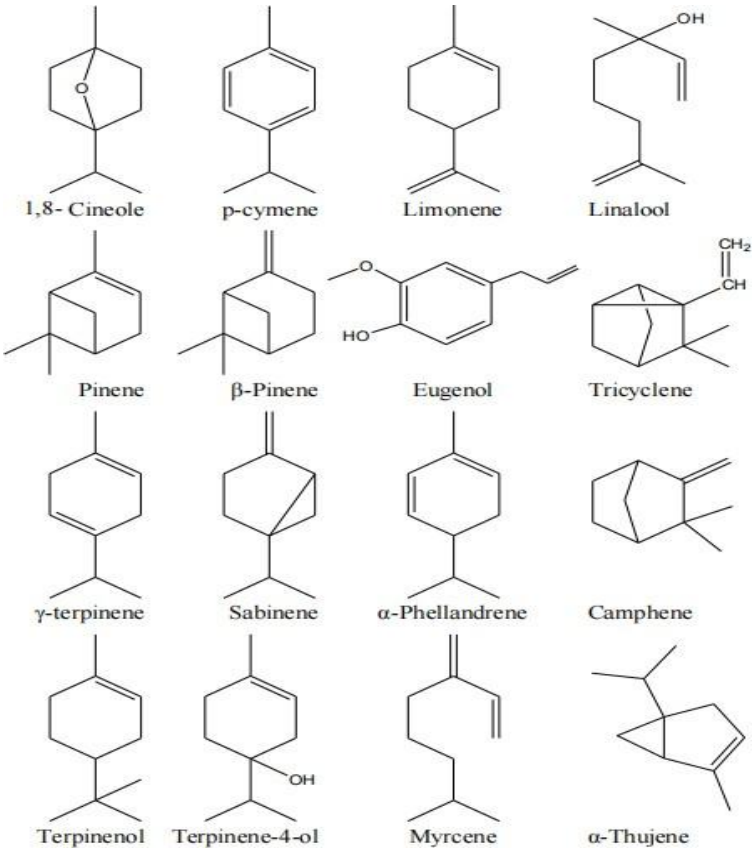


Figure 2. Composés identifiés dans l'huile essentielle des feuilles de *L. nobilis* (Chahal *et al*., 2017).

6.1.2. Composés phénoliques

Les polyphénols sont plus de 8000 molécules à noyau aromatique hydroxylé (Harborne& Baxter, 1999). Dans *L. nobilis*, flavones et flavonols confèrent une activité antioxydante (Hanif *et al*., 2020).

Leurs groupements hydroxyles assurent un piégeage des radicaux libres (Naczk & Shahidi, 2004). Riches en ces composés, les feuilles sont utilisées dans l'agroalimentaire pour leurs effets antioxydants et antimicrobiens (Nithya *et al*., 2016 ; Zerrouki &Riazi, 2021). *L.nobilis*

contient toutes les classes phénoliques : flavonoïdes, acides phénoliques, tannins et lignanes (Dobroslavić *et al*., 2022). Leurs teneurs varient selon l'origine, l'extraction et le solvant.

Les composés phénoliques végétaux neutralisent les radicaux libres via leurs groupements hydroxyles (Naczk&Shahidi, 2004). *L. nobilis* possède des activités antioxydante et antimicrobienne (Hanif *et al*., 2020 ; Nithya *et al*., 2016 ; Zerrouki &Riazi, 2021). Elle contient flavonoïdes, acides

Phénoliques, tannins et lignanes (Dobroslavić *et al*., 2022), dont les teneurs varient selon l'origine, l'extraction et le solvant

6.1.3. Flavonoïdes

Les flavonoïdes (>6000 composés) sont des pigments polyphénoliques ubiquitaires chez les plantes vasculaires (Erlund, 2004 ; Havsteen, 2002). Leur activité antioxydante repose sur la réactivité de leurs groupements hydroxyles. Ils piègent efficacement l'oxygène singulet et les radicaux libres (Bravo, 1998) et possèdent des propriétés antibactériennes, antivirales, anti-inflammatoires, anticancéreuses et antiallergiques (Di Carlo *et al.,* 1999 ; Hossain *et al.,* 2012 ; Montoro *et al.,* 2005). Dans les feuilles de *L. nobilis*, les flavones et flavonols sont majoritaires, avec l'apigénine, le kaempférol, la quercétine et leurs glycosides (Alejo-Armijo *et al.*, 2017) **(Figure 3)**.

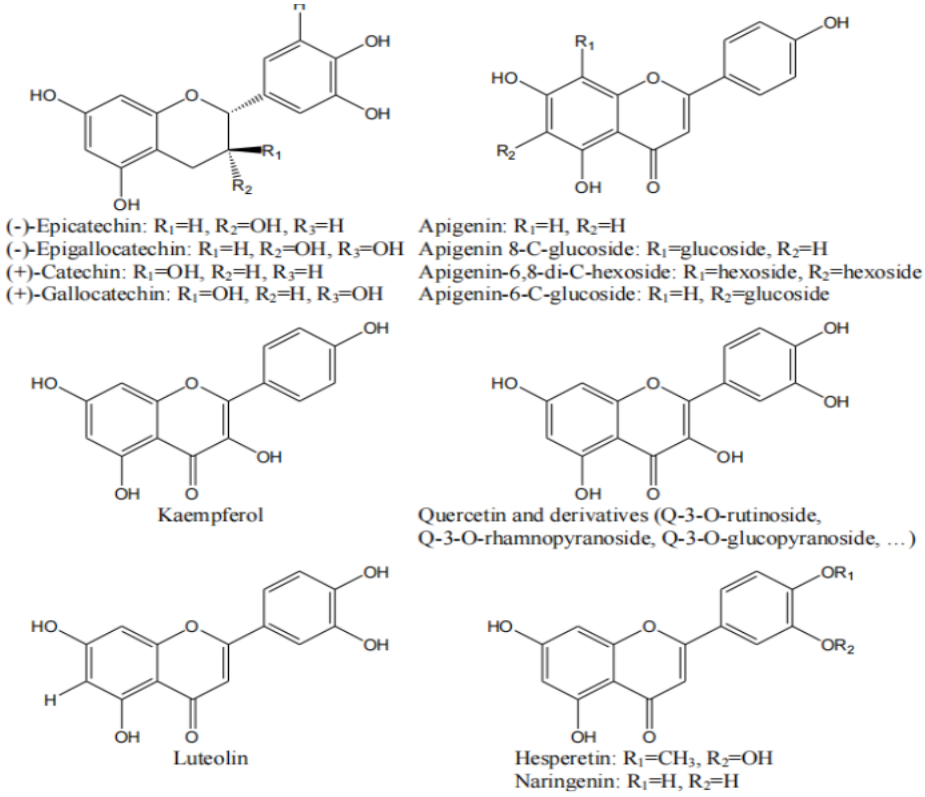


Figure 3. Quelques flavonoïdes des feuilles de *L. nobilis* (Konovalov&Alieva, 2019).

6.1.4. Proanthocyanidines

Les proanthocyanidines (tanins condensés) sont des oligomères et polymères de flavanes à forte activité antioxydante, présents dans certains aliments et compléments. Vinha *et al*. (2015) ont montré que dans les feuilles de laurier, les formes dimériques sont prédominantes **(Figure 4)**.

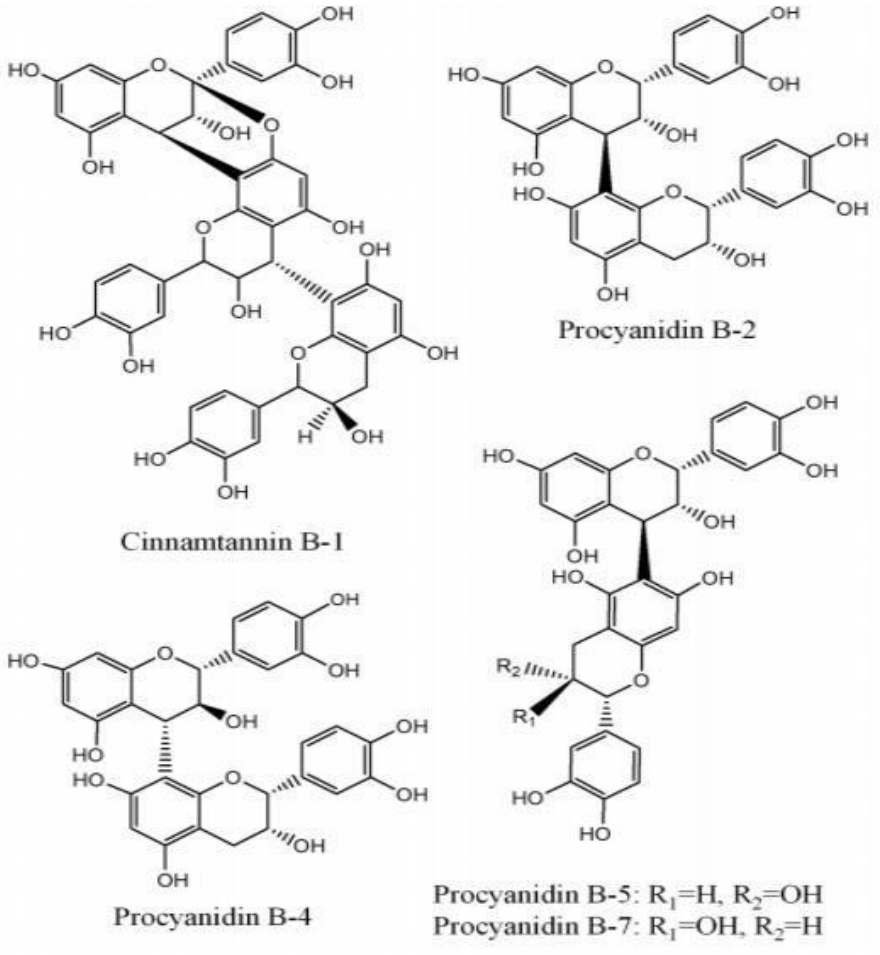


Figure 4. Quelques proanthocyanidines des feuilles de *L. nobilis* (Konovalov&Alieva, 2019).

6.1.5. Autres composés phénoliques

Les feuilles de laurier renferment des esters des acides caféique et coumarique avec l'acide quinique ou 3,4-dihydroxyphényllactique, ainsi que quatre lignanes isolés d'un extrait hydroalcoolique (Alejo-Armijo *et al.,* 2017).

6.2.Alcaloïdes

Les alcaloïdes sont des métabolites secondaires azotés majoritairement végétaux. Plus de 10 000 ont été identifiés, présentant des activités antioxydante, antibactérienne et anticancéreuse (Hassan *et al*., 2013 ; Nithya *et al*., 2016). Dix alcaloïdes ont été isolés des feuilles de *L. nobilis* : cinq noraporphines (2,4,6,8,9), quatre aporphines (3,5,7,10) et une benzyl-tétrahydro-isoquinoléine (1) **(Figure 5)**. Les composés 1,4,8 sont présents dans l'écorce, le composé 9

dans les racines, et la noraporphine 4 est l'alcaloïde majeur des feuilles (Pech &Bruneton, 1982).

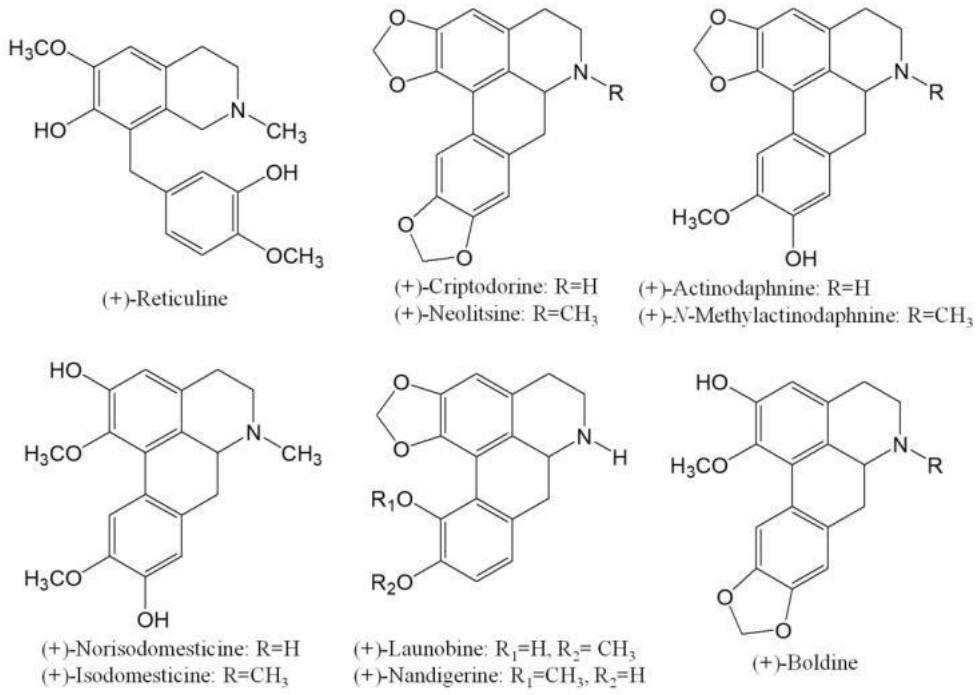


Figure 5. Alcaloïdes des feuilles de *L. nobilis* (Alejo-Armijo *et al.,* 2017).

7. Utilisation traditionnelles et effets thérapeutiques

Au-delà de ses usages culinaires, *Laurus nobilis* présente des propriétés médicinales exploitées depuis l'Antiquité. Les feuilles, largement commercialisées (>2000 t/an), sont dominées par la Turquie (2/3 du marché mondial). Elles sont utilisées en alimentation, hygiène et pharmacologie (Ravindran, 2017).

7.1.Usages médicinaux

En médecine traditionnelle, les feuilles de *Laurusnobilis* sont utilisées contre les rhumatismes, entorses, troubles digestifs et douleurs auriculaires. Elles présentent des activités antidiarrhéiques, anti-inflammatoires et antidiabétiques, avec un effet immunomodulateur.

Leur richesse en composés bioactifs explique leurs effets anti-inflammatoires, la réduction de l'absorption de l'alcool et la stimulation de la glutathion S-transférase hépatique (Fang *et al.,* 2005).

Des constituants de l'huile essentielle de *Lauru snobilis* (eugénol, méthyleugénol, pinène) présentent des effets anticonvulsivants et analgésiques (Sayyah *et al.,* 2002 ; Barla *et al.*, 2007).

Les feuilles sont également utilisées dans la prise en charge du diabète et des migraines (Aljamal, 2010 ; Fang *et al.,* 2005 ; MirbadalZadeh & Shirdel, 2011).

En usage traditionnel, les feuilles fraîches traitent la dysenterie, les inflammations et les troubles rénaux, ainsi que diverses affections (arthrite, céphalées, mycoses, anorexie, rhumes, cataractes, diarrhées, ulcères) (Parthasarathy *et al.*, 2008).

Les feuilles de *Laurusnobilis* présentent des activités antifongiques, antivirales, antibactériennes et antiparasitaires, ainsi qu'un potentiel antiprolifératif. Elles sont utilisées contre les affections respiratoires (fièvre, toux, grippe, bronchite, asthme).

Le jus de laurier est également employé pour soulager les troubles oculaires, notamment la cécité nocturne liée à une carence en vitamine A (Hanif *et al.,* 2020).

7.2.Utilisations culinaires

Les épices proviennent de divers organes végétaux et s'utilisent fraîches, séchées ou en poudre (Raghavan &Orsat, 2007 ; Schweiggert *et al.,* 2007).

Les feuilles de *Laurusnobilis* aromatisent plats mijotés, sauces, poissons, viandes et boissons. Leur amertume à l'état frais favorise leur séchage préalable. Broyées, elles sont largement utilisées en industrie alimentaire (Elzebroek& Wind, 2008).

7.3.Utilisations cosmétiques

L'huile essentielle de *Laurusnobilis*, obtenue par distillation à la vapeur, est utilisée en parfumerie et cosmétique (bougies, parfums, crèmes, savons) (Elzebroek& Wind, 2008). Elle constitue notamment un composant du savon d'Alep, associée à l'huile d'olive et à des agents alcalins (Ballabio & Goetz, 2010).

7.4.Utilisations pharmacologiques

La richesse du laurier noble en molécules aux propriétés antioxydantes a conduit les chercheurs à identifier de nombreuses activités biologiques et pharmacologiques, parmi lesquelles des effets antioxydants, antibactériens, antifongiques, antiviraux et insecticides (Chahal *et al.,* 2017).

7.4.1. Activité antioxydante

Les feuilles de *Laurusnobilis* présentent une forte activité antioxydante. Des extraits aqueux et éthanoliques inhibent la peroxydation lipidique jusqu'à 96,8 % et 98,6 % (60 µg/ml), comparables au BHA, BHT et α-tocophérol (Elmastaş *et al*., 2006).

L'extrait alcaloïdique montre une activité élevée (CI_{50} = 63,28 µg/ml), supérieure à l'acide gallique, tandis que l'extrait phénolique est moins actif (CI_{50} = 317,57 µg/ml) (Khaled Khodja *et al*., 2021).

7.4.2. Activité antidiabétique

Les feuilles de *Laurusnobilis* présentent une activité antidiabétique, avec une réduction significative de la glycémie à jeun (21–26 %) chez des patients diabétiques après administration de 1–3 g/j pendant 30 jours (Khan *et al.*, 2009).

In vitro, l'extrait éthanolique améliore la sensibilité à l'insuline et réduit le stress oxydatif, effets attribués aux composés phénoliques, notamment l'acide gallique (Bourebaba *et al.*, 2021).

Des études in vivo confirment l'activité antidiabétique de *Laurusnobilis*. Chez des rats diabétiques, l'extrait (200 mg/kg, 28 jours) réduit la glycémie et favorise la régénération des îlots pancréatiques (Mohammed *et al.,* 2021).

De plus, les polyphénols de l'extrait alcoolique diminuent la glycémie à jeun et stimulent la sécrétion d'insuline (Al Chalabi *et al.,* 2020).

Les composés bioactifs de *Laurusnobilis* améliorent la glycémie postprandiale. Les terpènes exercent un effet antidiabétique en inhibant l'α-amylase et l'α-glucosidase (Daher *et al.,* 2021). In vitro, l'extrait phénolique inhibe fortement l'α-glucosidase (11–93 %), selon le solvant et l'origine des feuilles, contribuant à la réduction de la glycémie (Duletić-Laušević *et al.*, 2019).

7.4.3. Activité antihyperlipidémique

Les extraits de feuilles de *Laurusnobilis* réduisent les troubles lipidiques. Chez des lapines, 30 jours d'administration d'extraits bruts (100 mg/kg), de flavonoïdes (50 mg/kg) ou de glycosides (12,5 mg/kg) diminuent le cholestérol total, le LDL et les triglycérides (AL-Samarrai *et al*., 2017).

Chez des rats diabétiques, les polyphénols alcooliques (200 mg/kg/j, 1 mois) abaissent cholestérol total, LDL et triglycérides, et augmentent le HDL (Al Chalabi *et al.*, 2020).

Chez l'humain, la tisane de laurier (5 g/100 ml, 10 j) augmente le HDL chez des volontaires sains (Chbili *et al*., 2020), et réduit le cholestérol total, LDL, triglycérides tout en augmentant le HDL chez des diabétiques de type 1 (Aljamal, 2010).

7.4.4. Activité hépatoprotectrice

L'extrait brut de *L. nobilis* protège les hépatocytes de rat contre la toxicité du paracétamol à 40 µg/ml (Ayoub *et al.,* 2013). De même, l'extrait méthanolique administré à 400 mg/kg présente une activité antioxydante hépatique, prévenant l'hépatotoxicité induite par le paracétamol (Ravindran *et al.,* 2013).

Par ailleurs, certains composés phénoliques, dont flavonoïdes et eugénol, préservent les hépatocytes des altérations métaboliques et histologiques induites par le tétrachlorométhane (Gasparyan *et al*., 2015).

7.4.5. Activité antimutagène

Les feuilles de *L. nobilis* contiennent du p-coumarate de 3-kaempférol (20 mg/100 g), un agent antimutagène contre le Trp-P-2, carcinogène alimentaire, avec une CI50 de 1,9 µg, comparable aux flavonols et flavones. Son effet repose sur l'inhibition de la transformation métabolique du Trp-P-2 en forme cancérogène, la fraction kaempférol étant déterminante (Samejima *et al.,* 1998)

7.4.6. Activité anticonvulsivante

L'huile essentielle de *L. nobilis*, utilisée en pharmacopée traditionnelle iranienne, prévient les convulsions toniques chez la souris, induites par électrochoc maximal et pentylènetétrazole. Les composés actifs incluent méthyl-eugénol, eugénol et pinène. Aux doses efficaces (1,22–1,71 ml/kg), elle provoque sédation et troubles moteurs, attribués au cinéol et aux eugénols (Sayyah *et al.,* 2002).

7.4.7. Activité immunostimulante

La poudre de *L. nobilis* stimule l'immunité non spécifique chez la truite arc-en-ciel. Après 21 jours d'alimentation à 0,5–1 % de laurier, l'activité phagocytaire, les taux de lysozymes et les protéines totales ont significativement augmenté (Bilen&Bulut, 2010).

7.4.8. Activités analgésiques et anti-inflammatoires

L'huile essentielle de *L. nobilis* a montré des effets analgésiques (tail-flick, formol) et anti-inflammatoires dose-dépendants sur l'œdème chez souris et rat, avec légère sédation. Son efficacité est comparable à la morphine et au piroxicam (Sayyah *et al.,* 2003).

7.4.9. Activité cicatrisante

L. nobilis améliore la cicatrisation, augmentant la contraction des plaies, la masse du tissu de granulation et la teneur en hydroxyproline. L'histologie révèle plus de cellules inflammatoires et moins de collagène comparé au contrôle (Nayak *et al*., 2006).

7.4.10. Activité antibactérienne

Les feuilles de *L. nobilis* présentent une activité antibactérienne notable. L'extrait méthanolique inhibe Staphylococcus aureus, Enterococcus gallinarum, Haemophilus influenzae et Pseudomonas aeruginosa (CMI 6–10 mg/ml) (Ozcan*et al.,* 2010). Les huiles essentielles montrent une action bactéricide sur S. aureus, S. intermedius et Klebsiella pneumoniae (CMI 0,01–1 mg/ml) (Derwich *et al.,* 2009).

L'huile essentielle de *L. nobilis* montre une activité antibactérienne et antistaphylococcique (CMI 3,9–15,6 mg/ml) et inhibe >70 % de la formation de biofilm à 1/16 CMI, avec une éradication de 79,6–95,2 % (MTT) suggérant un potentiel contre les infections buccales (Merghini *et al.,* 2016). L'extrait alcaloïdique (1 mg/ml) inhibe fortement les staphylocoques

alimentaires (zones 12–22 mm), tandis que l'extrait phénolique cible les souches phytopathogènes de pomme de terre (zones 12–17 mm) (Khaled Khodja *et al*., 2021). Intragastriquement, l'extrait phénolique (50–100 mg/kg) améliore la flore bénéfique et réduit les bactéries pathogènes chez le rat (Berendika *et al.,* 2022)

7.4.11. Activité fongicide

L'huile essentielle de *L. nobilis*, riche en isoeugénol (53,5 %), montre une activité antifongique contre Candida (CMI/CMF 250–500 mg/ml). L'augmentation des CMI avec sorbitol et ergostérol suggère une action sur la paroi et la perméabilité membranaire. À 2× CMI, elle inhibe l'adhésion et la formation de biofilm, comparable à la nystatine (Peixoto *et al.,* 2017).

Les composés aromatiques de *L. nobilis* (phénols, géraniol) actifs contre les bactéries le sont aussi contre les champignons, nécessitant toutefois des expositions plus longues. In vitro, sept souches phytopathogènes ont été testées (50–250 mg/ml), avec une meilleure inhibition de *Botrytis cinerea* à 250 mg/ml (Patrakar *et al.,* 2012).

7.4.12. Activité antivirale

L'huile essentielle de *L. nobilis*, riche en 1,8-cinéole, β-ocimène, α- et β-pinènes, inhibe in vitro la réplication du SARS-CoV et du HSV-1. Elle présente une CI50 de 120 µg/ml et un indice de sélectivité de 4,16 contre le SARS-CoV (Patrakar *et al*., 2012).

Roviello et Roviello (2021) ont identifié neuf composés de *L. nobilis* avec forte affinité pour la protéase Mpro du SARS-CoV-2, dont le lauruside 5, candidat prometteur pour son inhibition. L'association 1,8-cinéole/monoterpénol de l'huile essentielle reste efficace contre les infections virales bénignes ORL (Franchomme *et al.,* 2001).

7.4.13. Activité insecticide

L'huile essentielle de *L. nobilis* présente une activité insecticide dose- et temps-dépendante contre Triboliumcastaneum, la fraction polaire étant la plus efficace (Chahal *et al.,* 2016). Elle agit également comme répulsif et toxique sur Rhyzoperthadominica (RD50 0,013 ml/cm² ; LC50 68 ml/l) eT. castaneum (RD50 0,045 ml/cm² ; LC50 172 ml/l) (Jemâa *et al.,* 2012), et montre un effet répulsif contre Culex pipiens (Erler *et al*., 2006).

Chapitre 2 : Microencapsulation

1. Généralités

La microencapsulation, technologie maîtrisée depuis environ 70 ans, consiste à enrober un matériau actif par une matrice protectrice (Nedovic*et al*. 2011). Les microcapsules (5–5 000 µm, majoritairement 5–500 µm) améliorent la stabilité et prolongent la durée de conservation des produits (Krishnan *et al*. 2010 ; Khorshidian*et al*. 2019 ; Nedovic *et al*. 2011 ; Paulo & Santos, 2017 ; Lesmes &McClements, 2009).

Ce procédé modifie les propriétés physicochimiques, facilite la manipulation et permet l'utilisation de faibles doses d'actifs (Lesmes &McClements, 2009 ; Czerniak *et al*. 2015). Son application industrielle requiert l'optimisation du coût, des procédés et de l'acceptabilité sensorielle (Paulo & Santos, 2017 ; Aguiar *et al*. 2016).

La microencapsulation protège les composés sensibles (vitamines, antioxydants, huiles essentielles), limite les interactions indésirables et assure une libération contrôlée, améliorant la biodisponibilité (Yousefi *et al*. 2020 ; Arab *et al*. 2019 ; Shi *et al*. 2008). Une libération progressive dans le GIT optimise l'efficacité des ingrédients (Pham-Hoang *et al*. 2013 ; Yousefi *et al*. 2019).

Elle préserve les composés des traitements thermiques, réduit les pertes nutritionnelles et améliore les propriétés sensorielles et la qualité des aliments.

Les matériaux d'encapsulation incluent protéines, lipides, amidons et levures (Krishnan *et al*. 2010 ; Gouin, 2004). Reconnues *GRAS*, ces dernières — notamment *Saccharomyces cerevisiae* — sont largement utilisées (Paramera *et al*. 2014).

Les levures, essentielles en fermentation et biotechnologie, présentent neutralité sensorielle, faible coût et polyvalence. Leurs microcapsules, utilisables dans divers aliments, assurent protection et libération contrôlée (Paramera*et al*. 2014). En pharmaceutique, S. cerevisiae encapsule des molécules telles que l'acyclovir et la berbérine (Krishnan *et al*. 2010 ; Salari *et al*. 2015).

2. Matériaux d'encapsulation Couramment Utilisés Dans l'industrie Alimentaire

Une large gamme de matériaux d'enrobage, conformes aux normes alimentaires et reconnus *GRAS*, est utilisée pour encapsuler des composés liquides, solides ou gazeux (Nedovic *et al*. 2011).

Leur sélection dépend de la fonction du noyau, de sa concentration, du mécanisme de libération, ainsi que des exigences de stabilité et de coût (Khorshidian *et al*. 2019). Ces matériaux doivent assurer une protection efficace contre les contraintes de transformation et de stockage, sans interactions indésirables avec le noyau, tout en restant facilement manipulables, même à forte concentration (Yousefi *et al*. 2019).

Les principaux matériaux de paroi utilisés pour l'encapsulation des composés bioactifs en industrie alimentaire sont présentés en **figure 6** (Desai& Park, 2005 ; Sultana *et al*. 2018).

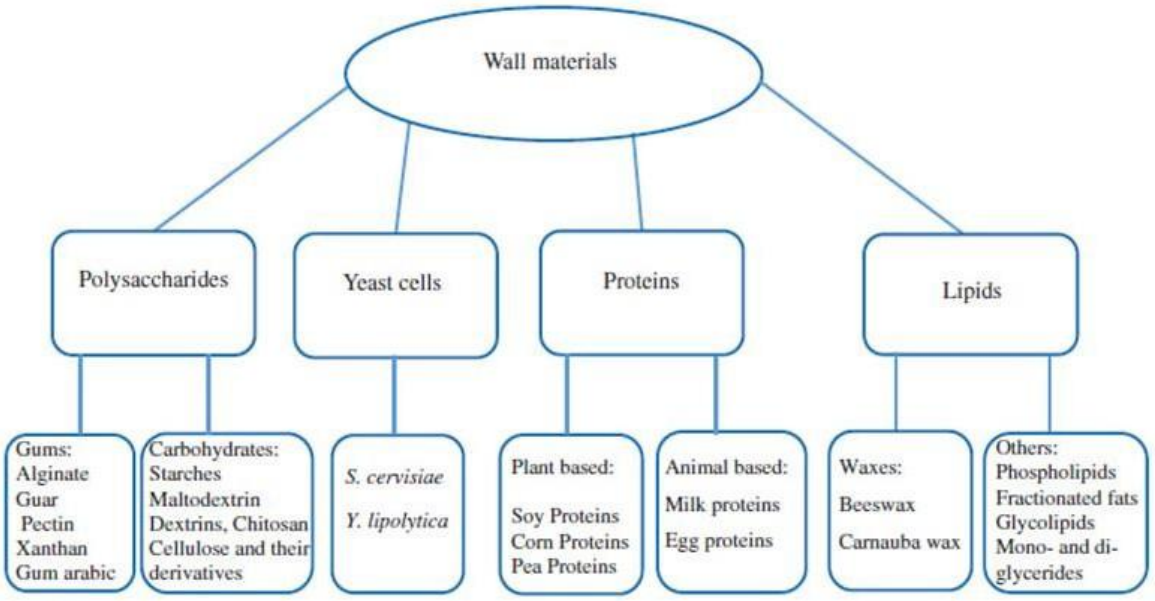


Figure 6. Matériaux d'enrobage couramment utilisés pour l'encapsulation des composés bioactifs dans les microcapsules.

3. **Méthodes d'encapsulation couramment utilisées dans l'industrie alimentaire**

Différentes méthodes d'encapsulation ont été développées pour l'encapsulation des ingrédients alimentaires ; les techniques les plus couramment utilisées sont illustrées à la figure 7:

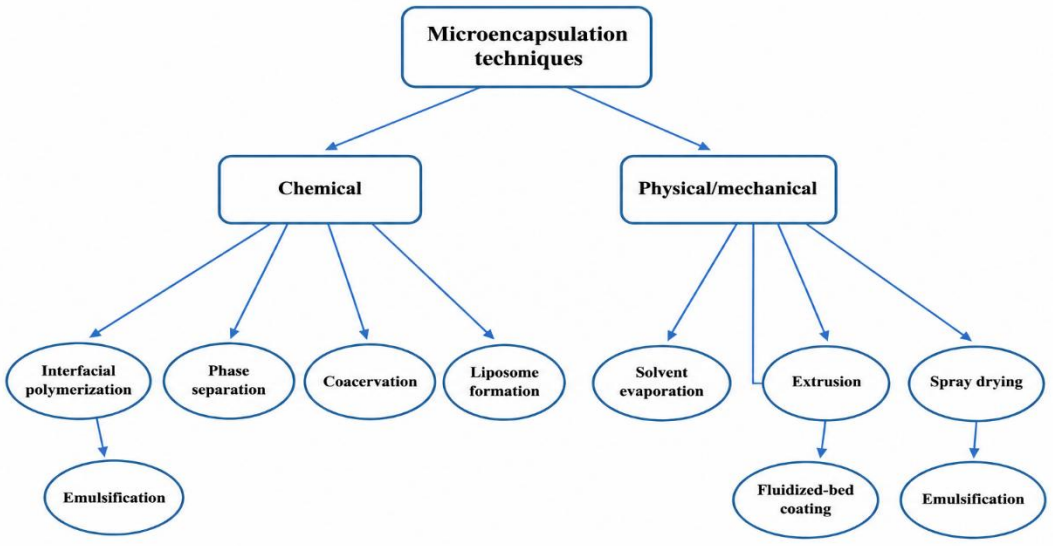


Figure 7. Types de méthodes d'encapsulation utilisées dans l'industrie agroalimentaire.

3.1.Séchage par atomisation

Le séchage par atomisation est une technique majeure d'encapsulation, rapide, flexible et économique, permettant d'obtenir des poudres de haute qualité (Liu & Liu, 2009).

Une solution noyau/paroi est atomisée dans une chambre chauffée (160–220 °C), provoquant l'évaporation rapide de l'eau et la formation de particules sèches, ensuite séparées de l'air (Roccia *et al*. 2014).

Encapsulation des composés bioactifs par les cellules de levure malgré sa simplicité industrielle, cette méthode présente des limites pour les composés thermosensibles (dégradation des protéines, brunissement non enzymatique, perte d'activité des bioactifs et probiotiques) (Rocha *et al*. 2012 ; O'Riordan *et al*. 2001).

Les cellules de levure sont des vecteurs efficaces par cette technique (Ruphuy *et al*. 2020 ; Dadkhodazade *et al*. 2018). Une étude a montré qu'une température d'entrée de 200 °C n'altère pas l'encapsulation de l'éthylhexanoate dans *Saccharomyces cerevisiae* (Sultana *et al*. 2017).

De plus, l'encapsulation de curcumine et d'ibuprofène dans des particules de glucane de levure améliore la dissolution ; l'efficacité d'encapsulation augmente avec la teneur en solides et la taille des gouttelettes (Ruphuy *et al*. 2020).

Enfin, *S. cerevisiae* présente une meilleure rétention et stabilité des arômes (D-limonène, éthylhexanoate) que la maltodextrine, avec moins de produits d'oxydation (Sultana *et al*.2018).

3.2.Extrusion

L'extrusion est une technique clé d'encapsulation des micro-organismes, opérant à basse température et en conditions aérobies ou anaérobies (Bamidele&Emmambux, 2020). Elle consiste à extruder un mélange biopolymère–actif à travers une aiguille, formant des gouttelettes ensuite solidifiées en capsules (Joye&McClements, 2014).

Les particules obtenues varient du µm au mm ; les grandes tailles limitent leur dispersion dans certaines matrices alimentaires (ex. chocolat, lait concentré) (Imai *et al*. 1999). La taille dépend principalement du diamètre de l'aiguille et du débit (Krasaekoopt *et al*. 2003).

Divers polymères sont utilisés ; l'alginate de calcium améliore la survie de *Lactobacillus acidophilus* et des *Bifidobacterium* (Grosso &Fávaro-Trindade, 2004).

L'encapsulation confère une meilleure résistance aux conditions acides et thermiques et améliore la stabilité. Toutefois, cette technique présente des limites industrielles : faible productivité et taille élevée des particules (Gouin, 2004).

3.3.Coacervation

La coacervation est une technique d'émulsification modifiée, atteignant jusqu'à 99 % d'efficacité d'encapsulation. Elle repose sur l'incorporation d'actifs dans une solution polymérique formant des gouttelettes sphériques (Gouin, 2004).

Les cellules de S. cerevisiae présentent une capacité de charge supérieure au β-glucane pour les oméga-3 (Beikzadeh*et al*. 2019). L'encapsulation du thymol et du carvacrol de Zatariamultiflora dans *S. cerevisiae* montre des charges de 44,53 % et 30,88 %, sans altération de l'activité antibactérienne (NakhaeeMoghadam *et al*. 2020).

La coacervation peut être simple (un polymère : alginate, gélatine, protéines) ou complexe (plusieurs colloïdes), cette dernière étant adaptée aux composés hydrophobes (Comunian *et al*. 2013 ; Rocha-Selmi et *al*. 2013).

Cette méthode est efficace pour les composés fonctionnels (ex. polyphénols), mais nécessite un contrôle rigoureux des paramètres opératoires (Nesterenk *et al*. 2013).

4.Cellules de levure comme matériau d'encapsulation

Les cellules de levure agissent comme microconteneurs naturels pour composés hydrophiles et lipophiles (Czerniak *et al*. 2015 ; Pham-Hoang *et al*. 2013). Les molécules hydrosolubles diffusent et se retiennent intracellulairement (Shi *et al*. 2008), tandis que les composés lipophiles sont efficacement piégés, notamment dans des cellules riches en lipides (Ciamponi *et al*. 2012). Des cellules à faible teneur lipidique (<5 %) peuvent aussi être utilisées sans prétraitement, avec une capacité de charge élevée (Bishop *et al*. 1998).

Divers composés ont été encapsulés : huiles essentielles (Bishop *et al*. 1998), huile de pourpier (Kavosi *et al*. 2017), resvératrol (Shi *et al*. 2008), acide chlorogénique (Shi *et al*. 2007) et enzymes (Chow &Palecek, 2008).

Cette approche est applicable en industrie alimentaire : l'encapsulation du limonène par *S. cerevisiae* améliore la stabilité des arômes lors de traitements thermiques et permet une libération prolongée (Dardelle *et al*. 2007).

Le procédé est simple et économique, sans ajout de matrices externes (Paramera *et al*. 2014). Utilisées depuis les années 1970 (Corrêa-Filho *et al*. 2019), les levures (~5 µm) (Nelson *et al*. 2006) incluent *S. cerevisiae*, mais aussi *Torulopsislipofera*, *Saccharomyces bayanus*, *Endomycesvernalis, Candida utilis* et *Kluyveromycesfragilis* (Paramera *et al*. 2014).

S. cerevisiae constitue un vecteur performant : les cellules plasmolysées améliorent la stabilité de la thymoquinone (dégradation minimale 52,63 % en 8 jours) (Karaman, 2020). Pour la vitamine D3, une efficacité d'encapsulation de 76,10 ± 6,92 % est obtenue après plasmolyse et séchage par atomisation (Dadkhodazade *et al*. 2018).

La paroi et la membrane plasmique assurent une protection contre l'oxygène, la lumière et les

radicaux libres, permettant une libération contrôlée (Lesmes&McClements, 2009 ; Krasaekoopt *et al*. 2003 ; Ciamponi *et al*. 2012).

Enfin, l'encapsulation d'extraits d'*Hibiscus sabdariffa* (anthocyanines) dans *S. cerevisiae* améliore la stabilité, notamment après traitement thermique et à pH acide, confirmant leur potentiel comme vecteurs de colorants (Zlotnik *et al*. 1984).

4.1.Paroi cellulaire

La paroi cellulaire, principal composant des levures **(Figure 8)**, maintient la forme, protège le protoplasme contre la lyse et entoure certaines enzymes pour limiter leurs activités indésirables (Zlotnik *et al*. 1984).

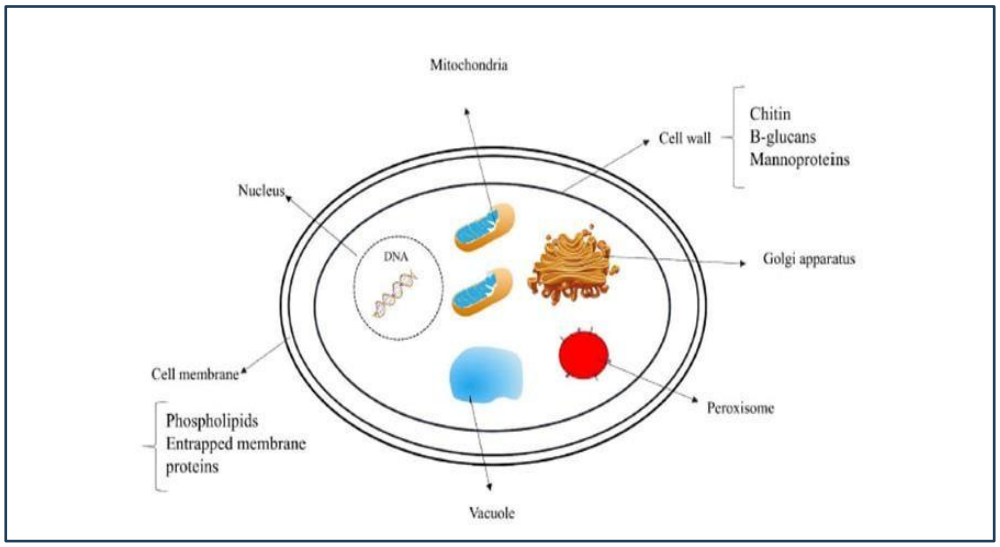


Figure 8. Structure schématique de la cellule de levure.

La paroi cellulaire de *S. cerevisiae* est composée d'une couche de mannoprotéines (~10 nm) et d'un réseau de β-glucanes 1,3/1,6 lié à une fine couche de chitine, avec une épaisseur totale de 70–100 nm (15–25 % de la masse sèche) (Chow &Palecek, 2008 ; Nelson *et al*. 2006).

Les β-glucanes et la chitine assurent rigidité, tandis que les mannoprotéines contrôlent la porosité (Chow &Palecek, 2008). La perméabilité peut être modulée par traitement chimique, affectant ponts disulfures et liaisons hydrophobes (Shi *et al*. 2010).

Seules les petites molécules (<620 Da, rayon ≤0,81 nm) traversent facilement la paroi, qu'elles soient hydrophiles ou hydrophobes (Scherrer *et al*. 1974). La paroi présente une activité antimutagène et antigénotoxique, le β-D-glucane inhibant la peroxydation lipidique et les dommages oxydatifs de l'ADN. Elle a montré un effet protecteur contre les cellules cancéreuses chez la souris (Ghoneum *et al*. 2008)

Elle peut être utilisée seule comme vecteur : l'enrobage de probiotiques (*Lactobacillus acidophilus, Bifidobacteriumbifidum*) avec la paroi améliore la survie de *L. acidophilus*dans

le jus de raisin (Mokhtari *et al*. 2017). De même, la bio-accessibilité du curcumin est augmentée avec la paroi cellulaire lors d'une digestion simulée (Young *et al*. 2020).

La paroi est amphiphile (mannoprotéines hydrophiles, chaînes polypeptidiques hydrophobes), fonctionnant comme bio-émulsifiant (De Iseppi *et al*. 2019). Différentes levures fournissent des mannoprotéines pour des applications alimentaires (ex. *S. cerevisiaeKA01* (Dikit *et al*. 2010 ; Cameron *et al*. 1988), *Yarrowialipolytica* (Amaral *et al*. 2006)). Le bio-émulsifiant « *Yansan* » forme des émulsions stables à pH 3–9 (Amaral *et al*. 2006).

Les sous-produits de levure servent aussi à l'encapsulation : les conjugués de Maillard issus de débris hydrolysés de *S. pastorianus* protègent l'acide ascorbique et conservent *les β-glucanes* après hydrolyse (Marson *et al*. 2020). Les particules glucane-mannane-lipides de *S. cerevisiae* encapsulent l'acide humique et contribuent à la détoxification de l'aflatoxine B1 (Hamza *et al*. 2019). L'huile de tournesol peut être encapsulée dans des levures de brasserie épuisées, dont les protéines hydrolysées améliorent la stabilité de l'émulsion et la protection oxydative (Vélez-Erazo *et al*. 2020).

4.2.Membrane plasmique

Sous la paroi (<10 μm), la membrane plasmique bicouche contient des phospholipides, des stérols et des lipides neutres, et ressemble à une structure liposomale, adaptée à l'encapsulation (Nelson *et al*. 2006). Elle constitue le principal obstacle à la perméabilité, régulant le passage des substances intra- et extracellulaires (Czerniak *et al*. 2015 ; Pham-Hoang et al. 2013).

Sultana *et al*. (2018) ont utilisé la membrane lipidique de *S. cerevisiae* pour encapsuler le D-limonène et l'hexanoate d'éthyle ; la température influence la libération, tandis que la stabilité oxydative

Du D-limonène reste élevée. Martinelli *et al*. (2020) ont montré que des nanovésicules dérivées de membranes plasmatiques mimétiques offrent un transporteur efficace pour des médicaments.

5.Prétraitements avant encapsulation des levures

Les prétraitements chimiques des levures, visant à vider le contenu cellulaire, augmentent la capacité de chargement et le rendement d'encapsulation. Les méthodes courantes sont l'autolyse, la plasmolyse et l'hydrolyse enzymatique (Tanguler&Erten, 2008).

5.1. Autolyse

L'autolyse utilise les enzymes hydrolytiques natives pour libérer les composés cytoplasmiques (Alexandre & Guilloux-Benatier, 2006). Dans l'industrie alimentaire, elle se réalise typiquement à pH 5,5 et 50 °C (Dziezak, 1987).

Czerniak *et al*. (2015) ont montré que le rendement d'encapsulation (EE) passait de 32,6 %

(témoin) à 45,3 % après autolyse avec acétate d'éthyle et Glucanex R200, l'acétate augmentant la perméabilité et l'enzyme hydrolysant partiellement la paroi. Shi *et al*. (2007) ont observé une hausse d'environ 50 % de l'EE après plasmolyse.

Dimopoulos*et al*. (2020), encapsulant de l'huile essentielle d'origan, ont confirmé qu'une autolyse préalable augmentait la diffusion et la perméabilité des parois de *S. cerevisiae*.

5.2.Plasmolyse

La plasmolyse extrait l'eau intracellulaire et certains solubles (protéines, acides nucléiques, sucres, enzymes), créant un espace pour le matériau central (Korber, Choi, Wolfaardt, & Caldwell, 1996). Elle peut être induite par enzymes (adénylate kinase, pyruvate kinase), saccharose, NaCl, glycérol ou solvants organiques (acétone, acétate d'éthyle) (Paramera, Konteles, &Karathanos, 2011).

Shi *et al*. (2007) ont montré que le rendement d'encapsulation (EE) de l'acide chlorogénique passait de 6,2 % (non traitée) à 12,6 % après plasmolyse (NaCl 5 %, 54 °C, 24 h, 150 rpm). De même, l'huile de graines de pourpier a présenté une EE accrue (52,96 → 60,27 %) et une capacité de chargement plus élevée (186,87 → 211,68 g•kg^{-1}) avec NaCl 10 %, 55 °C, 48 h (Kavosi, Mohammadi, Shojaee-Aliabadi, Khaksar, &HosseiniSeyede, 2017).

Takalloo, Nikkhah, Nemati, Jalilian, et Sajedi (2020) ont comparé autolyse, plasmolyse et hydrolyse enzymatique, identifiant la plasmolyse comme la plus efficace pour obtenir un extrait riche.

Cependant,Paramera, Konteles, et Karathanos (2011) ont constaté que la plasmolyse n'augmentait pas le chargement de curcumine, suggérant que celui-ci dépend d'interactions spécifiques avec la paroi et la membrane. Young, Dea, et Nitin (2017) ont montré que l'infusion sous vide augmentait le chargement de curcumine (×3) et de fisétine (×2), compensant les limites de la plasmolyse et renforçant les interactions cœur–organite.

D'autres prétraitements, tels qu'ultrason, champs électriques pulsés et homogénéisation à haute pression, facilitent également l'encapsulation (Dimopoulos, Katsimichas, Tsimogiannis, Oreopoulou, &Taoukis, 2020). Pham-Hoang, Romero-Guido, Phan-Thi, et Waché (2018) ont utilisé l'ultrason (6 min à 50 %) pour charger du *β-carotène* dans *Yarrowialipolytica*, quadruplant l'EE par rapport au traitement par solvant seul.

6.Aspects de qualité des microcapsules de cellules de levure

6.1.Stabilité photochimique et oxydative

Les composés bioactifs sont sensibles à la lumière et à l'oxygène, mais l'encapsulation dans les cellules de levure améliore leur stabilité. Shi, Rao, Yu, Xiang, Yang, et Ji (2008) ont montré que la microencapsulation du resvératrol dans *Saccharomyces cerevisiae* protège

contre la photodégradation grâce aux mannoprotéines et *β-glucanes* 1,3 de la paroi. Paramera, Konteles, et Karathanos (2011) ont rapporté qu'après 30 jours d'exposition solaire, la rétention de curcumine passait de 62,8 % (non encapsulée) à 87,2 % (encapsulée), la protection résultant d'interactions avec la paroi ou la membrane lipidique bicouche.

Kavosi, Mohammadi, Shojaee-Aliabadi, Khaksar, et Hosseini (2017) ont encapsulé l'huile de graines de pourpier, riche en oméga-3 et ions métalliques sensibles à l'oxydation, dans des levures avec enrobage de *carboxyméthylcellulose* (CMC). La valeur peroxydique a montré une meilleure stabilité oxydative après 30 jours. L'usage de cellules plasmolysées augmente l'espace intracellulaire, logeant plus d'huile et limitant son exposition aux agents oxydants.

6.2.Stabilité thermique :

Les microcapsules de levure offrent une protection thermique grâce à leur paroi cellulaire entourant la membrane plasmique. L'encapsulation de la curcumine dans *Saccharomyces cerevisiae* protège efficacement contre le stress thermique à plus de 200 °C (Paramera, Konteles, &Karathanos, 2011).

La microencapsulation des arômes, comme le limonène, permet leur conservation lors de procédés industriels sévères ; le limonène n'est libéré qu'au-delà de 265 °C, lorsque la paroi se rompt (Normand, Dardelle, Bouquerand, Nicolas, & Johnston, 2005). Paramera, Konteles, et Karathanos (2011) ont confirmé que la structure de *S. cerevisiae* reste stable jusqu'à 265 °C, se dégradant au-delà.

6.3.Libération in vitro et ciblage du cœur

Les microcapsules de levure permettent une libération contrôlée et prolongée du matériau central. Pour le limonène, Normand, Dardelle, Bouquerand, Nicolas, et Johnston (2005) ont montré qu'une libération significative nécessitait plus de 260 °C et une activité de l'eau supérieure à 0,7, expliquant le faible flux dans les levures sèches (Paramera, Konteles, &Karathanos, 2011).

La microscopie à force atomique a révélé que le gonflement des levures en milieu aqueux ouvre des pores dans la couche de mannoprotéines, augmentant la perméabilité (Dardelle, Normand, Steenhoudt, Bouquerand, Chevalier, & Baumgartner, 2007 ; Normand, Dardelle, Bouquerand, Nicolas, & Johnston, 2005). La libération implique désintégration puis dissolution, influencée par la solubilité, la taille, l'affinité et l'hydrophobicité du composé (Melia & Davis, 1989).

Les composés amphiphiles, tels que certains arômes et *β-carotène*, pénètrent plus facilement dans la membrane plasmique des levures, la polarité et la structure moléculaire optimisant l'encapsulation (Pham-Hoang, Voilley, &Waché, 2016). Sultana et Yoshii (2019) ont montré

que *D-limonène* et *hexanoate* d'éthyle encapsulé dans *S. cerevisiae* présentaient un flux maximal à 60 °C et 80 % HR, l'hexanoate d'éthyle migrant plus rapidement grâce à une énergie d'activation plus faible.

Paramera, Konteles, et Karathanos (2011) ont observé que la libération du curcuma encapsulé dans les levures était lente dans le SGF, favorisée par les interactions avec la paroi cellulaire et la membrane plasmique, améliorant solubilité et stabilité. De même, le resvératrol encapsulé montre une libération prolongée, avec environ 90 % libéré en 90 min, permettant un ciblage efficace du cœur actif (Shi, Rao, Yu, Xiang, Yang, & Ji, 2008 ; Zlotnik, Pilar Fernandez, Bowers, &Cabib, 1984).

Pour l'acide chlorogénique, la libération maximale a été observée dans le SGF (pH 1,2), avec 95 % libéré en 2 h et complète après 5 h, tandis que le tampon phosphate (pH 7,4) et l'eau distillée ralentissaient la libération, en raison de l'instabilité en milieu basique et de la structure de la paroi de levure (mannoprotéines, glucanes, chitine) (Shi, Rao, Yu, *et al*., 2007 ; Feuillat, 2003 ; Klis, Mol, Hellingwerf, &Brul, 2002).

6.4.Portée commerciale et impact sensoriel

Les cellules et extraits de levure améliorent l'arôme et la saveur des aliments grâce à leurs acides aminés, vitamines B, peptides et nucléotides, et sont utilisés dans les produits de boulangerie, carnés, sauces, fromages et même les savons (Vidal, Santana, Paglarini, *et al*. 2020 ; Alim, Song, Liu, Zou, Zhang, & Zhang, 2018). Les composés aromatiques se forment principalement lors du chauffage.

Les microcapsules de levure permettent une libération contrôlée des arômes sans rupture cellulaire, et leurs protéines externes prolongent la rétention en bouche, assurant une diffusion durable (Dardelle, Normand, Steenhoudt, Bouquerand, Chevalier, & Baumgartner, 2007). Elles sont particulièrement adaptées pour encapsuler des huiles essentielles ou saveurs intenses, réduisant l'impact sensoriel négatif des ajouts directs (Dima, Neagu, Cercel, & Alexe, 2014).

Par exemple, NakhaeeMoghadam, Khameneh, et Bazzaz (2019) ont montré que des microcapsules de levure contenant de l'huile essentielle de *Zatariamultiflora* réduisaient la concentration minimale inhibitrice et amélioraient la perception sensorielle dans une soupe au poulet. Beikzadeh, Mohammadi, Shojaee-Aliabadi, Khaksar, et Hosseini (2017) ont rapporté que l'huile de lin encapsulée dans *S. cerevisiae* améliorait le goût du pain par rapport à l'huile libre, et que l'ail ou la saveur de bœuf encapsulés dans la levure offraient un arôme et une persistance supérieurs à la poudre conventionnelle (Paramera, Karathanos, &Konteles, 2014 ; Dardelle, Normand, Steenhoudt, Bouquerand, Chevalier, & Baumgartner, 2007).

Cependant, l'ajout dans les jus de fruits peut nuire à la texture et à l'acceptabilité globale, le goût de levure étant perçu comme indésirable (Mokhtari, Khomeiri, Jafari, Maghsoudlou, &Ghorbani, 2017). L'utilisation de revêtements multiples ou résistants aux acides, comme l'alginate, pourrait atténuer ce goût. En revanche, dans les produits compatibles avec la saveur de levure (boulangerie, charcuterie), les microcapsules offrent une solution sensorielle efficace et commercialement viable.

Chapitre 3 : Analogues de viande d'origine végétale

1. Généralités

Les analogues carnés d'origine végétale constituent une source alternative de protéines dont les propriétés texturales, nutritionnelles et sensorielles peuvent être modulées afin de se rapprocher de celles de la viande (Choudhury *et al*., 2020). Historiquement, ces substituts étaient élaborés à partir d'ingrédients tels que les champignons, le riz, les lentilles, les protéines de soja ou le gluten de blé, auxquels étaient ajoutés des arômes carnés pour améliorer la flaveur (Joshi & Kumar, 2015). Le tempeh et le tofu, dérivés du soja, ainsi que le seitan à base de gluten de blé, représentent des exemples traditionnels largement utilisés (Kyriakopoulou *et al*., 2019 ; Dekkers *et al.,* 2018 ; van der Goot *et al.,* 2019). Les analogues de viande incluent également les protéines végétales texturées (TVP), produits secs expansés obtenus à partir de concentrés protéiques, principalement de soja, et structurés par extrusion (Malav *et al*., 2015). Plus récemment, le développement d'analogues carnés sans gluten a suscité un intérêt croissant, reposant sur l'utilisation de protéines de pois, de riz, de fèverole ou de lupin, afin de répondre aux besoins des consommateurs intolérants au gluten ou atteints de maladie cœliaque (Webb &Alavi, 2022).

Un analogue de viande désigne un aliment d'origine végétale conçu pour reproduire la structure, la texture et les attributs sensoriels de la viande. Plusieurs dénominations sont employées dans la littérature, notamment « viande d'origine végétale », « substitut de viande » ou « imitation de viande ». Dans un contexte de demande croissante pour des systèmes alimentaires durables et face aux impacts environnementaux de la production animale, le développement de ces alternatives suscite un intérêt accru. Leur consommation pourrait contribuer à réduire l'apport en cholestérol et le risque de maladies cardiovasculaires, tandis qu'une consommation élevée de viande rouge est associée à une augmentation du risque de cancer colorectal (Hu *et al*., 2019). Les formulations sans gluten s'inscrivent également dans cette dynamique, en élargissant l'accessibilité des analogues carnés tout en nécessitant des stratégies technologiques spécifiques pour compenser l'absence du réseau viscoélastique du gluten (Kyriakopoulou *et al.,* 2021). Les recherches actuelles se concentrent sur l'optimisation des matières premières, des procédés de structuration et de l'acceptabilité des analogues carnés dans une perspective d'approvisionnement alimentaire durable.

2. Matériaux utilisés pour la viande végétale

Les caractéristiques qualitatives des alternatives à la viande, telles que la texture, la saveur et la couleur, dépendent du choix des ingrédients. Ces produits contiennent

typiquement 50–80 % d'eau, 4–20 % de protéines non texturées, 10–25 % de protéines végétales texturées, 0–15 % de matières grasses, ainsi que des additifs aromatiques (3–10 %), des colorants (0–5 %) et des liants (1–15 %). L'eau apporte du moelleux, facilite l'émulsification et réduit les coûts de production, tandis que les protéines contribuent à la structure, à la texture et à la valeur nutritionnelle. Les protéines texturées peuvent servir soit d'extenseurs de viande, soit de substituts totaux pour des produits végétariens ou végétaliens. Seules, elles ne reproduisent ni la texture ni le goût de la viande, mais incorporées à celle-ci, elles améliorent ses qualités organoleptiques. Les alternatives végétales sont conçues pour reproduire, après réhydratation et cuisson, la texture, la forme, le goût et la couleur de la viande, sans composants animaux (Sha&Xiong, 2020). L'ajout minimal d'additifs, comme les concentrés de protéines de soja, le gluten de blé, les amidons ou les hydrocolloïdes, permet d'optimiser la rétention d'eau et la consistance finale. La maîtrise de ces composants est essentielle pour l'acceptabilité sensorielle et la satisfaction du consommateur.

2.1.**Protéines**

La demande en protéines végétales augmente en raison de leur coût, accessibilité, adaptabilité aux formulations et, surtout, de leurs propriétés physiologiques (Haque *et al.*, 2016). Elles remplissent des fonctions clés dans les substituts de viande, telles que la rétention d'eau et de matière grasse, l'émulsification, la gélification, le pouvoir moussant et la dissolution, ces propriétés variant selon la séquence d'acides aminés, la structure chimique et l'organisation spatiale des protéines. Des facteurs environnementaux comme le pH, la température et la force ionique modifient également leur fonctionnalité. La recherche actuelle vise à comprendre les liens entre procédés de transformation, structure et propriétés fonctionnelles afin d'obtenir une texture et une structure proches de celles de la viande (Singhal *et al*., 2016).

La plupart des substituts sont fabriqués à partir de protéines de soja, pour leurs caractéristiques fonctionnelles et leur faible coût. D'autres sources incluent les protéines d'oléagineux, celles issues de la fermentation microbienne (Kim *et al*., 2011), les protéines de céréales (maïs, riz, blé), les farines de haricots et céréales, les concentrés et dérivés de soja, ainsi que le gluten de blé (Kumar *et al*., 2017). Plus récemment, les champignons comestibles et les micro-algues sont exploités comme sources de protéines texturées pour les alternatives à la viande (Zhang *et al*., 2022).

2.1.1. **Protéines de soja**

Les protéines de soja sont largement utilisées dans les analogues de viande sous forme

de farine, concentrés ou isolats, en raison de leurs propriétés fonctionnelles telles que la rétention d'eau, la gélification, l'absorption des lipides et l'émulsification. La farine, forme la moins transformée (torréfiée, entière ou dégraissée), contient environ 50 % de protéines après extraction lipidique. Les concentrés (≈70 % de protéines) sont obtenus par extraction alcoolique, tandis que les isolats (≈90 %) résultent d'une extraction alcaline suivie d'une précipitation acide. Les isolats présentent une saveur neutre et une couleur claire, favorables à la formulation d'analogues carnés. Toutefois, une pureté protéique élevée n'est pas indispensable ; la présence d'autres constituants peut même améliorer les propriétés technologiques des substituts de viande (Geerts *et al*., 2018 ; Goot *et al*., 2016 ; Grabowska *et al.*, 2016).

2.1.2. **Protéines de légumineuses**

Les protéines de légumineuses (lentilles, pois chiches, lupin, pois, haricots) sont étudiées pour leurs propriétés gélifiantes, moussantes et émulsifiantes (Berghout *et al*., 2015 ; Ladjal-Ettoumi *et al*., 2016). La protéine de pois, notamment après extrusion à haute humidité, apparaît particulièrement adaptée aux substituts de viande. Bien que les structures protéiques du pois soient plus souples que celles du soja, leur résistance peut être renforcée par la modification des interactions hydrogène, via l'ajout d'ions chaotropes ou l'optimisation des paramètres d'extrusion (Osen&Schweiggert-Weisz, 2016).

Les prétraitements technologiques influencent également l'aptitude à la gélification. Les protéines de légumineuses, surtout celles du pois, peuvent former des structures fibreuses analogues à la viande (Plattner, 2020). L'augmentation de la teneur en protéines améliore la fermeté et la mastication grâce à la formation d'un réseau protéique réticulé, tandis que la résistance au cisaillement dépend notamment de la température d'extrusion (Sha&Xiong, 2020). Par ailleurs, l'association de fibres d'avoine et d'isolat de protéines de pois, extrudée à haute humidité, permet d'obtenir des structures fibreuses longues **(figure 9)** et fines caractéristiques des analogues carnés (Kaleda *et al*., 2021).

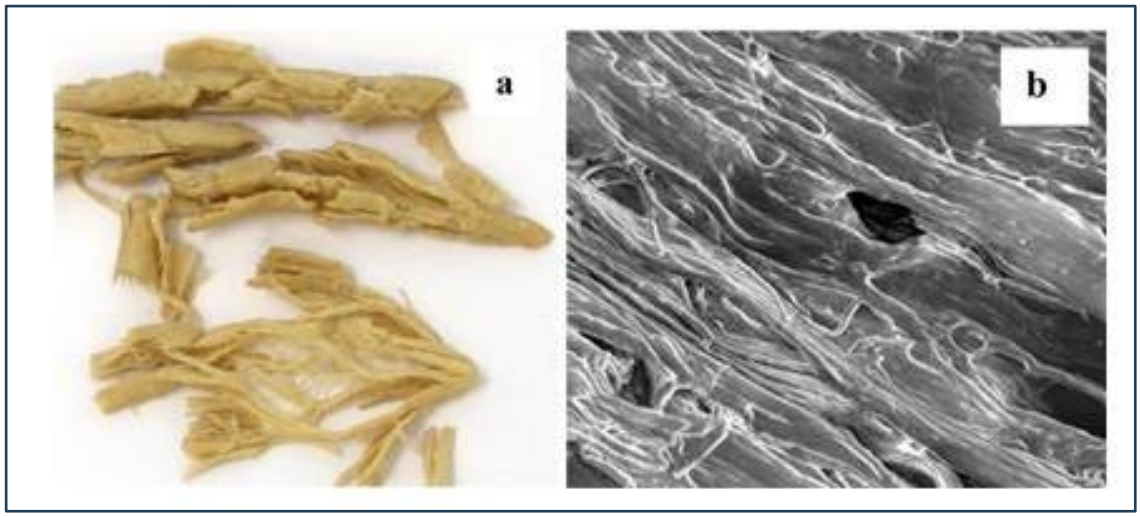


Figure 9. Viande végétale (a) Structure intacte et étirée des analogues de viande avoine-pois après réhydratation (b) Fibres et pores observés au microscope électronique à balayage (Kaleda *et al*.,2021).

2.1.3. **Protéines de graines oléagineuses**

Le canola et le colza représentent des sources protéiques intéressantes, reconnues pour leurs propriétés émulsifiantes et moussantes (Chang *et al*., 2015 ; Ntone *et al*., 2022). Sous haute pression ou température, les protéines de colza peuvent gélifier et générer des textures proches de la viande. La napine forme, avec la β-caséine, des agrégats stabilisés par interactions ioniques, hydrophobes et ponts salins, ce qui favorise son utilisation comme agent structurant (Schwartz *et al*., 2015). Les fractions protéiques du canola, majoritairement constituées de globulines et d'albumines, développent des gels cohérents en présence de sels. De plus, leur association avec le κ-carraghénane renforce les interactions protéine–polysaccharide, confirmant le potentiel structurant des protéines de canola.

2.2.**Huiles et matières grasses**

Les substituts de viande contiennent généralement peu de lipides, car les ingrédients dégraissés sont privilégiés. Toutefois, l'incorporation de matières grasses influence fortement la formation de la structure fibreuse lors de l'extrusion. Des teneurs supérieures à 15 % d'huile induisent un effet lubrifiant, limitant l'alignement des macromolécules et réduisant les forces de cisaillement. Malgré cela, l'ajout d'huiles végétales améliore la flaveur, la jutosité et la tendreté, des attributs sensoriels essentiels pour mimer la viande (Geerts *et al*., 2018). Les huiles de canola, colza, soja, palme, coco et tournesol sont couramment utilisées. L'incorporation de protéines partiellement fermentées contenant

naturellement des lipides constitue également une alternative pour moduler la texture et la qualité sensorielle. Ainsi, l'ajout contrôlé de matières grasses demeure crucial pour l'acceptabilité des analogues carnés.

2.3. Agents liants

Les agents liants, d'origine végétale ou animale, assurent la rétention d'eau et de lipides dans les substituts de viande. Parmi les plus utilisés figurent le gluten de blé, la gomme xanthane, les protéines de soja, les œufs et le carraghénane. Les ingrédients riches en protéines forment un réseau structurant, tandis que les amidons et farines agissent comme charges en piégeant l'eau et les graisses. L'effet des liants dépend fortement de leur nature et de leur concentration, influençant la texture et la valeur nutritionnelle (Arora *et al.*, 2017). Des formulations de texturation ont historiquement intégré lait et eau (10–20 %), gluten (1–5 %) et albumine (10–20 %). Le gluten de blé présente un fort potentiel liant grâce à ses propriétés viscoélastiques (Nawrocka *et al.*, 2017), tandis que le blanc d'œuf améliore l'adhésion et la teneur protéique. Les isolats et concentrés de soja sont également largement employés. Par ailleurs, des polysaccharides tels que la gomme guar, la cellulose et la pectine sont utilisés comme liants et agents texturants dans les analogues carnés (Varadan *et al.*, 2015).

2.4. Exhausteurs de goût et d'arôme

L'acceptabilité des alternatives à la viande dépend fortement de leurs caractéristiques gustatives et aromatiques. Pour reproduire le goût carné, des arômes, épices, précurseurs réactionnels et complexes de fer, tels que la chlorophylline ferreuse ou des protéines contenant de l'hème, sont utilisés (Fraser *et al.*, 2017). Lors des traitements thermiques, notamment l'extrusion, des transformations chimiques affectent les composés aromatiques, entraînant la formation ou la perte de substances volatiles. Les interactions entre sels, sucres, acides et réseau protéique modifient également la texture et l'expression aromatique. Ces conditions favorisent la réaction de Maillard et d'autres réactions génératrices de nouveaux composés aromatiques issus d'acides aminés et de sucres (Guo *et al*., 2020 ; Sun *et al*., 2022). L'arôme de rôti est particulièrement recherché, bien que des notes indésirables puissent apparaître. L'optimisation sensorielle repose ainsi sur la qualité des matières premières et la maîtrise des conditions de formation des arômes (Lu *et al.*, 2018). Les arômes de viande peuvent être reproduits à l'aide de sucres réducteurs (xylose, glucose, ribose, fructose), d'acides aminés (cystéine, cystine, proline, lysine, sérine, méthionine, thréonine), de nucléotides et de thiamine (Fraser *et al.*, 2017). L'hydrolyse enzymatique de protéines végétales, notamment de soja, permet également de générer des

arômes de poulet ou de bœuf après ajustement du pH (Wu et al., 2000). Les systèmes protéine végétale/D-xylose/L-cystéine produisent des composés soufrés caractéristiques des notes carnées, tandis que la combinaison ribose–cystéine favorise la formation de composés hétérocycliques soufrés contribuant à la saveur globale. Ainsi, la reproduction du profil aromatique carné demeure un défi technologique majeur nécessitant un contrôle précis des précurseurs et des conditions de transformation (Lu *et al.,* 2018).

2.5. Agents colorants

La couleur constitue un critère essentiel de qualité pour les analogues carnés, nécessitant l'ajout de colorants afin de reproduire l'apparence de la viande. Les protéines végétales, telles que le soja ou le gluten, confèrent en effet une teinte jaune-brun éloignée du rouge de la viande crue ou du brun de la viande cuite. Des colorants thermostables, notamment le caramel, le rocou, le malt, le cumin, le curcuma et le carotène, sont couramment utilisés (Malav *et al*., 2015 ; Rolan *et al.,* 2008 ; Vrljic *et al.,* 2015). Pour imiter l'évolution colorimétrique observée lors de la cuisson, des colorants thermolabiles associés à des agents réducteurs sont également employés. Les extraits de betterave et la bétanine permettent notamment de reproduire la teinte de la viande. Les sucres réducteurs (dextrose, mannose, arabinose, maltose, lactose) contribuent au brunissement via des réactions de type Maillard (Rolan *et al*., 2008).

Les colorants peuvent être incorporés avant la structuration ou injectés durant l'extrusion. Toutefois, l'obtention d'une teinte satisfaisante reste complexe en raison des différences de pH et des phénomènes de migration. Ces limitations peuvent être atténuées par l'ajustement du pH (acides citrique, acétique, lactique) et par l'utilisation d'agents fixateurs tels que la maltodextrine ou l'alginate hydraté (Orcutt *et al.,* 2008).

3. Formation d'analogues de viande par extrusion à haute teneur en humidité

La structuration des analogues carnés repose principalement sur l'extrusion à haute teneur en humidité (>40 %), permettant d'obtenir des matrices fibreuses similaires à la viande. Au cours du procédé, la chaleur et l'humidité induisent la dénaturation et le dépliement des protéines, suivis de leur réorientation sous l'effet des forces de cisaillement, de la pression et du refroidissement. Cette réorganisation favorise la formation de liaisons disulfure et la réticulation protéique, essentielles à la formation de structures fibreuses, d'où l'intérêt des protéines riches en cystéine (Pöri *et al*., 2022 ; Zahari *et al*., 2020).

Les paramètres d'extrusion (température, humidité, débit, refroidissement) influencent fortement la texture, l'élasticité et la fermeté du produit final. Par exemple, l'extrusion de féverole à 130–140 °C **(figure 10)** avec des débits contrôlés permet d'obtenir des analogues

aux propriétés sensorielles satisfaisantes (Saldanha do Carmo *et al*., 2021).

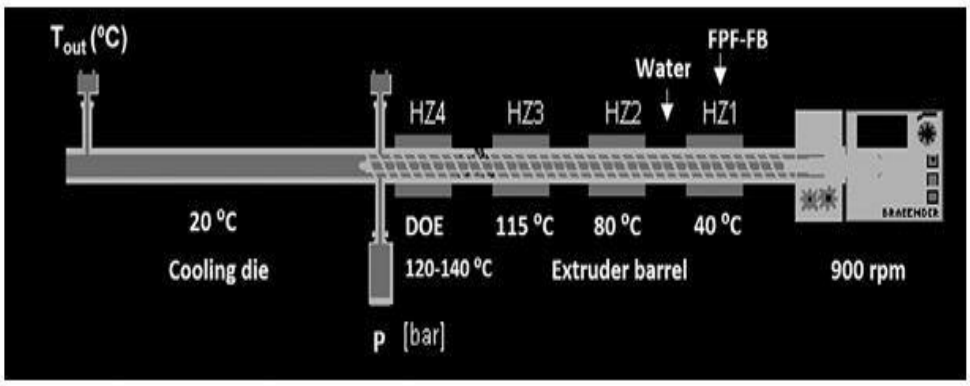


Figure 10. Configuration de l'extrudeuse pour les produits analogues à la viande HZ1 : Zone de chauffage 1 ; HZ2 : Zone de chauffage 2 ; HZ3 : Zone de chauffage 3 ; HZ4 : Zone de chauffage 4 (Saldanha do Carmo *et al.* ,2021).

De même, l'association de fibres d'avoine et d'isolat de protéines de pois, extrudée à haute humidité avec un refroidissement prolongé, renforce la structure fibreuse (Ramos Ramos Diaz *et al*., 2022). Le soja demeure la source protéique la plus utilisée pour ce procédé (Heusala et al., 2020). Ainsi, les propriétés des analogues carnés résultent de l'interaction entre composition des matières premières et conditions d'extrusion (Kyriakopoulou *et al.*, 2021).

4. **Préférence des consommateurs pour les alternatives à la viande à base de plantes**

L'alimentation influence à la fois la santé humaine et l'environnement. La consommation excessive de viande est associée à des impacts environnementaux majeurs, notamment l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, la pression sur les ressources hydriques et la perturbation du cycle du phosphore (Sans &Combris, 2015 ; Aiking& de Boer, 2018). La production alimentaire contribuerait à près de 30 % du réchauffement climatique, les protéines animales étant particulièrement impliquées. La transition vers des protéines végétales apparaît ainsi comme une stratégie durable pour réduire ces impacts environnementaux et améliorer la santé publique (de Boer &Aiking, 2019 ; Graça *et al*., 2019 ; Godfray *et al.*, 2018 ; Springmann *et al*., 2018 ; Van der Weele *et al*., 2019 ; Willett *et al*., 2019 ; Poore&Nemecek, 2018). Dans un contexte de croissance démographique et d'augmentation prévue de la demande en produits carnés, les substituts végétaux représentent une alternative prometteuse (Onwezen& Van der Weele, 2016 ; Raphaely&Marinova, 2016).

La popularité croissante des régimes végétariens et végétaliens contribue à l'essor des alternatives à la viande, bien que leur adoption reste limitée en Europe (Siegrist& Hartmann,

2019). Les perceptions liées à la santé, aux considérations éthiques et à l'environnement influencent les comportements d'achat (Hartmann &Siegrist, 2017 ; Hartmann &Siegrist, 2020). La consommation de viande demeure cependant associée à des représentations culturelles, notamment à la masculinité, tandis que les femmes adoptent plus fréquemment des régimes à base végétale (Judge & Wilson, 2019). Une proportion encore faible de consommateurs achète régulièrement des substituts de viande, bien que les utilisateurs réguliers perçoivent ces produits comme plus sains et favorables à l'environnement (Hagmann *et al*., 2019 ; Lemken *et al*., 2019 ; Bryant, 2019).

Plusieurs facteurs déterminent l'acceptation des alternatives à la viande, notamment la sensibilité environnementale, le niveau d'éducation et le genre, les femmes et les individus plus instruits étant généralement plus favorables. Les principaux freins incluent la méconnaissance, les qualités sensorielles insuffisantes, le prix et la praticité (Bryant, 2019). Le substitut idéal devrait être économiquement compétitif, riche en protéines et micronutriments, et moins calorique que la viande.

Le contexte social influence également l'acceptation des substituts. Les normes sociales et l'environnement de consommation modulent les choix alimentaires, les individus ayant tendance à aligner leur comportement sur celui de leur entourage (Higgs, 2015 ; Higgs & Thomas, 2016). La perception positive des repas végétariens peut être renforcée par l'image d'un mode de vie sain et respectueux du bien-être animal (Funk et al., 2020). L'acceptation des substituts varie ainsi selon le contexte, ces produits étant souvent mieux reçus dans des situations informelles que lors de repas formels. La compréhension des attentes et perceptions des consommateurs demeure essentielle pour orienter le développement et la commercialisation des alternatives à la viande.

5. Défis et opportunités dans les alternatives à la viande à base de plantes

L'essor des alternatives à la viande d'origine végétale résulte d'innovations technologiques et d'une demande croissante des consommateurs. Néanmoins, plusieurs défis persistent, notamment la reproduction fidèle des attributs sensoriels de la viande et l'acceptabilité par les consommateurs. Les critères déterminants incluent l'apparence, la texture, la flaveur et la sensation en bouche (Weinrich, 2019). Les progrès en formulation et en procédés devraient améliorer ces caractéristiques, mais l'utilisation de multiples additifs pour simuler les propriétés carnées soulève des interrogations relatives à la qualité nutritionnelle, à la sécurité sanitaire, à la transparence de l'étiquetage et à la confiance des consommateurs.

5.1.**Propriétés liées aux attributs sensoriels**

Les différences structurelles entre protéines végétales et tissus musculaires compliquent la reproduction fidèle de la viande. Les procédés thermo-mécaniques, tels que l'extrusion et le cisaillement, permettent de créer des structures fibreuses, mais celles-ci ne reproduisent pas entièrement l'anisotropie des fibres musculaires (Dekkers *et al.*, 2018). Les substituts végétaux doivent combiner texture fibreuse et capacité de rétention d'eau, souvent insuffisantes, ce qui conduit à une perception de sécheresse. Des agents texturants, liants hydriques et épaississants sont donc incorporés pour améliorer ces propriétés (Graça *et al*., 2019). Dans le cas des viandes végétales sans gluten, l'absence du réseau viscoélastique du gluten complique davantage la structuration fibreuse, nécessitant l'utilisation de matrices protéiques alternatives telles que les protéines de pois, de féverole, de lentille ou de riz, associées à des hydrocolloïdes (gomme xanthane, gomme guar) pour compenser les pertes de cohésion et améliorer la jutosité (Dinani *et al.,* 2023).

La reproduction de la saveur constitue également un défi. Des épices, arômes et précurseurs réactionnels sont utilisés pour simuler les notes carnées, mais des composés tels que l'hexanal ou le méthanethiol peuvent générer des odeurs indésirables, tandis que l'amertume est attribuée aux saponines et isoflavones du soja. L'ajout de composés hématiques permet d'obtenir une coloration rougeâtre et des notes caractéristiques de la viande cuite, bien que la viabilité économique de ces approches doive être évaluée. L'utilisation d'isolats protéiques de meilleure qualité peut contribuer à réduire les saveurs indésirables. Les formulations sans gluten présentent toutefois un profil aromatique spécifique, souvent dominé par des notes légumineuses plus marquées, ce qui impose l'optimisation des systèmes aromatiques et des réactions de Maillard pour obtenir une flaveur plus proche de la viande (Kyriakopoulou *et al*., 2021).

Sur le plan nutritionnel, les substituts végétaux sont parfois perçus comme plus sains, mais leur transformation intensive peut entraîner des pertes nutritives et une biodisponibilité incertaine des minéraux ajoutés (Ayivi *et al*., 2021). De plus, leur teneur en sodium est souvent supérieure à celle de la viande. Les facteurs antinutritionnels constituent également un enjeu, notamment les phytates et inhibiteurs de trypsine présents dans le soja, qui peuvent être réduits par traitement enzymatique ou thermique (Hurrell *et al*., 1992 ; Arntfield, 2018 ; Kwok *et al*., 1993). Les analogues carnés sans gluten peuvent présenter un avantage pour les consommateurs souffrant de maladie cœliaque ou d'intolérance au gluten, mais l'équilibre nutritionnel doit être soigneusement ajusté afin de compenser

l'absence de protéines de blé, notamment par la complémentarité entre protéines de légumineuses et de céréales sans gluten.

Un autre défi concerne la complexité des formulations, pouvant contenir plus de 20 ingrédients, incluant des additifs tels que la méthylcellulose ou la lécithine, ce qui complique l'étiquetage et suscite des interrogations sur leur valeur nutritionnelle (Bohrer, 2019). Par ailleurs, des composés potentiellement toxiques, comme les amines aromatiques hétérocycliques, peuvent se former lors de traitements thermiques à haute température, phénomène également observé pour la viande (Barzegar *et al.*, 2019 ; Jiang &Xiong, 2016). L'incorporation de composés phénoliques naturels pourrait réduire ces risques.

Enfin, certaines protéines végétales présentent un potentiel allergène, notamment les protéines de soja ou le gluten, nécessitant une attention particulière pour les populations sensibles (Miller, 2018). La forte teneur en eau des analogues carnés impose également un contrôle rigoureux des conditions de stockage et de la sécurité microbiologique. Le développement de viandes végétales sans gluten représente ainsi une voie prometteuse pour élargir l'accessibilité de ces produits, tout en posant des défis supplémentaires liés à la structuration, à la stabilité technologique et à l'optimisation des propriétés sensorielles.

6. Recherches futures et conclusion

Les légumineuses et les céréales riches en protéines offrent des avantages tant pour les végétariens que pour les consommateurs de viande. Tant que le marché des substituts carnés n'est pas pleinement mature, de nombreuses opportunités subsistent pour explorer de nouvelles approches. L'amélioration des qualités sensorielles, en particulier la texture, reste un objectif central de la recherche appliquée. Les protéines végétales peuvent être transformées en fibres ou en agrégats protéiques non filamentaires par des technologies traditionnelles ou émergentes, mais elles ne reproduisent pas encore pleinement les myofibrilles, les cellules musculaires et le tissu musculaire, ni leurs propriétés de rétention d'eau et de jutosité (Choudhury et al., 2020). Une compréhension approfondie de la fonctionnalité des ingrédients est essentielle pour optimiser les caractéristiques gustatives et esthétiques de type carné. L'utilisation d'épices et d'extraits aromatiques permet de simuler les saveurs de la viande et de masquer les arômes indésirables (Joshi & Kumar, 2015 ; Kyriakopoulou *et al*., 2019).

Les alternatives à la viande sans gluten, élaborées à partir de protéines de pois, de fèveroles, de riz ou de lupin, constituent une solution pour les consommateurs sensibles au gluten. Ces formulations utilisent des liants et hydrocolloïdes spécifiques afin de maintenir une texture fibreuse et une capacité de rétention d'eau similaire à celle de la viande, tout

en conservant une mastication satisfaisante et des qualités sensorielles comparables (Mishal *et al.*, 2022).

En conclusion, les produits protéinés végétaux constituent une option alimentaire complémentaire, mais ils ne sont pas susceptibles de remplacer complètement les produits carnés et avicoles traditionnels. La viande animale restera une source majeure de protéines à l'échelle mondiale. Il est recommandé d'employer des termes tels que « alternatives à la viande » ou « substituts de viande » plutôt que d'utiliser des appellations directement associées à la viande, afin d'éviter toute confusion ou attentes irréalistes. Les efforts scientifiques visent à développer des aliments nutritifs, naturels et durables, tout en explorant de nouvelles méthodes pour réduire les coûts de production et favoriser l'acceptation par les consommateurs (Sha&Xiong, 2020 ; Malav *et al*., 2015).

Matériel et Méthodes

Ce travail s'articule autour de deux volets complémentaires. La première partie est consacrée à la microencapsulation des composés phénoliques extraits de *Laurus nobilis* à l'aide de cellules de levure intactes et plasmolysées, ainsi qu'à la caractérisation biochimique des microcapsules obtenues.

La seconde partie porte sur la formulation d'une viande végétale sans gluten enrichie en extraits de laurier sous forme libre et microencapsulée. L'impact de cet enrichissement est évalué à travers une caractérisation approfondie des propriétés physicochimiques, de la qualité nutritionnelle et des attributs sensoriels des différentes formulations élaborées.

Les expérimentations ont été réalisées au sein des laboratoires pédagogiques d'agronomie et du Hall de Technologie de l'Université du 20 Août 1955 de Skikda.

1. Microencapsulation des composés phénoliques de *Laurus nobilis*

1.1.Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé dans cette étude expérimentale est les feuilles de *laurus nobilis*, communément appelée laurier. La récolte a été effectuée en 24 novembre 2025 dans la région de El Hadaeik plus précisément dans le jardin botanique de l'université de 20 Aout 1955 située dans la wilaya de Skikda, en Algérie **(figure11).**



Figure 11. Arbre de laurier (photo originale).

Les feuilles ont été triées manuellement, puis transportées jusqu'au laboratoire dans des sacs en plastique propres et hermétiques afin de limiter toute altération.

1.1.1. Extraction de *Laurus nobilis*

Après la récolte de la plante, les feuilles de laurier sont soigneusement rincées à l'eau du robinet afin d'éliminer tous les débris. Les polyphénols présents dans *Laurus nobilis* ont été extraits à l'aide d'un processus de macération.500 grammes de feuilles broyées ont été mis en

contact avec 1 L d'éthanol à 96 % dans un bécher recouvert de papier aluminium. Le mélange a été soumis à une macération à l'abri de la lumière pendant 24 heures à température ambiante. Après cette étape, l'extrait a été récupéré par filtration à l'aide d'un papier filtre Whatman n°1.Le solvant a ensuite été éliminé par évaporation sous pression réduite à l'aide d'un évaporateur rotatif (DLAB scientific, RE100-Pro, chine), Les extraits obtenus ont été finalement séchés à 30 °C dans une étuve. (Safdar *et al*., 2017).

1.1.2. Culture de la souche de *Saccharomyces cerevisiae*

La souche de levure utilisée dans cette étude est *Saccharomyces cerevisiae* (ATCC). Dans un premier temps, les cellules ont été cultivées sur un milieu solide de Sabouraud en boîtes de Pétri, puis incubées pendant 48 heures à 27 °C. Des colonies ont ensuite été sélectionnées pour l'inoculation d'un bouillon nutritif liquide. La culture a été réalisée dans un bouillon nutritif contenant. L'incubation a été poursuivie pendant 48 heures à 27 °C, sous agitation. En fin de croissance, les cellules ont été récoltées par centrifugation à 6000 rpm pendant 15 minutes (Nguyen *et al*., 2018).

1.1.3. Plasmolyse des souches de levures

Les levures fraîches obtenues ont été réparties en deux aliquotes identiques : l'une est restée non traitée, tandis qu'un total de 40 grammes de levure a été dissous dans 500 mL d'une solution de NaCl à 10%. Le traitement de plasmolyse a été effectué pendant 24 heures à une température ambiante Les cellules de levure ont ensuite été séparées par centrifugation à 6000 rpm pendant 15 minutes. (Kurek *et al*.,2023).

1.1.4. Micro encapsulation des composés phénoliques

Les composés phénoliques ont été microencapsulés à l'aide de cellules de levure intactes ou plasmolysées, dans un milieu aqueux. La levure et l'extrait de *Laurus nobilis* ont été mélangés. La procédure d'encapsulation a été réalisée sous agitation à température ambiante pendant 24 heures. Le mélange a ensuite été centrifugé à 6000 rpm pendant 15 minutes. Le culot obtenu a été récupéré puis séché (Kalinina *et al*., 2022).

2. Quantification des composés phénoliques

2.1. Dosage des polyphénols totaux

La teneur en polyphénols totaux des extraits, avant et après encapsulation, a été déterminée selon la méthode de Folin–Ciocalteu (Waterhouse,1999). Pour mesurer les polyphénols dans les extraits de laurier, une quantité de 2 ml d'extrait est mélangée avec 0,2 ml de réactif Folin-Ciocalteu et 1,4 ml de Na_2CO_3 à 7,5% (m/v). Le mélange est incubé dans l'obscurité à température ambiante pendant 2 heures, puis la lecture des absorbances est effectuée à 760 nm à l'aide d'un spectrophotomètre. La concentration en polyphénols a été calculée à partir d'une

courbe d'étalonnage réalisée avec l'acide gallique et exprimée en milligrammes d'équivalents acide gallique par gramme d'extrait sec (mg EAG/g).

2.2.Dosage des flavonoïdes

La quantification des flavonoïdes totaux a été réalisée selon la méthode de Chang *et al.* (2002) avec quelques modifications. Pour le dosage, 0,2 mL d'extrait ont été mélangés à 1,72 mL d'éthanol à 96 %, 0,4 mL de chlorure d'aluminium ($AlCl_3$) à 10 % et 1 mL d'acétate de sodium 1 M. Le mélange a ensuite été agité puis incubé à température ambiante, à l'obscurité, pendant 30 minutes, avant de mesurer l'absorbance à 415 nm à l'aide d'un spectrophotomètre. Les résultats ont été exprimés en milligrammes équivalents de quercétine par gramme d'extrait sec (mg EQ/g), sur la base d'une courbe d'étalonnage établie avec la quercétine.

3. Évaluation de l'activité antioxydante par la méthode du DPPH

L'activité antioxydante des extraits de feuilles de *Laurus nobilis*, sous forme libre ou encapsulée dans des cellules de levure intactes et plasmolysées a été évaluée par la méthode de piégeage du radical libre 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle (DPPH). Pour chaque analyse, 0,2 mL d'échantillon a été mélangé à 1,6 mL de solution de DPPH préparée dans l'éthanol. Les mélanges ont été incubés à l'obscurité pendant 30 min à température ambiante, puis l'absorbance a été mesurée à 517 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible. Le Trolox a été utilisé comme standard de référence. L'activité de piégeage du radical DPPH a été calculée selon l'équation suivante : L'activité de piégeage du radical DPPH a été calculée selon l'équation suivante :

$$\boldsymbol{I}(\%) = \frac{(\boldsymbol{Ab} - \boldsymbol{As})}{\boldsymbol{Ab}} \times \mathbf{100}$$

Où : Ab : absorbance du blanc (solution DPPH seule) ;

As : absorbance de l'échantillon (DPPH + extrait).

4. Formulation de la viande végétale sans gluten

Cette étape de formulation vise à développer un analogue de viande innovant enrichi en extrait de *Laurus nobilis* sous forme libre ou encapsulée dans des cellules de levure intactes et plasmolysées. Cette approche permet de valoriser une ressource naturelle à fort potentiel fonctionnel tout en explorant l'intérêt de l'encapsulation pour améliorer la protection et la stabilité des composés bioactifs.

4.1.Les ingrédients

Les ingrédients sélectionnés pour la conception de cet analogue de viande ont été choisis

pour leurs propriétés fonctionnelles et nutritionnelles, dans une approche naturelle exempte d'additifs de synthèse. La matrice protéique est constituée de haricot blanc et de lentilles, représentant chacun 32,5%, assurant ainsi la base structurelle du réseau protéique. La cohésion et la texture de la matrice sont renforcées par l'utilisation de flocons d'avoine (10,8 %) et de graines de lin (4,3 %), reconnus pour leur richesse en composés polysaccharidiques aux propriétés liantes.La fraction lipidique est apportée par l'huile d'olive (3,1 %), contribuant à la texture et aux qualités nutritionnelles du produit. Le profil aromatique est assuré par l'incorporation d'oignon (15 %), d'ail et d'un mélange d'épices (1,8 %), incluant notamment le paprika fumé, le sel et le poivre, permettant d'améliorer les caractéristiques sensorielles du produit (Tableau 3).Enfin, selon les formulations, l'analogue de viande est enrichi en extrait de *Laurus nobilis* ou en microcapsules de levure contenant cet extrait (formes intactes ou plasmolysées), incorporés à des concentrations variables (0,02 %, 0,03 % et 0,05 %), afin d'évaluer leur impact fonctionnel sur le produit final (Kyriakopoulou *et al.* 2021 ; Ahmed *et al.*, 2022).

Tableau3. Ingrédients utilisés pour la formulation de la viande végétale.

Ingrédients (% m/m)	**VV Témoin**	**VV-EL0,02**	**VV-EL0,03**	**VV-EL0,05**	**VV-EI0,02**	**VV-EI0,03**	**VV-EI0,05**	**VV-EP0,02**	**VV-EP0,03**	**VV-EP0,05**
Haricot blanc	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5
Lentilles	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5
Avoine	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8
Oignon	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
Graines de lin	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3
Huile d'olive	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
Ail et épices	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Extrait de *Laurus nobilis*	–	0,02	0,03	0,05	–	–	–	–	–	–
Microcapsules de levure intacte contenant l'extrait de *Laurus nobilis*	–	–	–	–	0,02	0,03	0,05	–	–	–
Microcapsules de levure plasmolysée contenant l'extrait de *Laurus nobilis*	–	–	–	–	–	–	–	0,02	0,03	0,05

**VV : viande végétale ; EL : extrait libre de* Laurus nobilis *; EI : extrait de* Laurus nobilis *encapsulé dans des cellules de levure intactes ; EP : extrait de* Laurus nobilis *encapsulé dans des cellules de levure plasmolysées. Les valeurs numériques (0,02 ; 0,03 ; 0,05) correspondent au pourcentage (% m/m) ajouté à la formulation.*

4.2.Production des analogues de viande

Un mélange d'ingrédients secs a été préparé, en utilisant les ingrédients suivants : haricots blancs, lentilles, avoine, graines de lin, paprika fumé, poivre noir, poudre d'oignon et d'ail, ainsi que des épices pour viande. Les ingrédients ont été mélangés pendant 10 min à température ambiante à une vitesse de 8000 tr/min à l'aide d'un mélangeur planétaire (Kitchen Aid Classic 5K45SSEWH, États-Unis).

Ensuite, un mélange a été préparé en incorporant de l'eau à une température de 85 °C, puis homogénéisé pendant 3,5 min à une vitesse de 20 000 tr/min jusqu'à l'obtention d'une consistance homogène. Le mélange obtenu a été protégé des conditions environnementales et laissé au repos pendant 16 min à température ambiante afin de permettre son hydratation et sa structuration. Le mélange d'ingrédients secs a ensuite été pétri pendant 6 min à une vitesse de 3000 tr/min à l'aide d'un mélangeur (Robot Coupe R2 Mixer, France). Le mélange final a été maintenu à l'abri des conditions extérieures et laissé reposer pendant 16 min à température ambiante. La masse obtenue a été façonnée en galettes à l'aide d'une presse mécanique. Chaque galette pesait 160 g, avec un diamètre de 100 mm et une hauteur de 20 mm (Royal Catering RCHM-100B, Allemagne). Ensuite, la cuisson a été réalisée à 180 °C pendant 10 min à l'aide d'un four mixte à vapeur en conditions de convection forcée (Küppersbusch Convect-Air Professional CPE 110, Allemagne). Enfin, tous les échantillons ont été refroidis à température ambiante puis soumis à des analyses physico-chimiques. (Szpicer *et al* ,2022).

Dans une perspective d'enrichissement fonctionnel, un extrait phénolique issu de *Laurus nobilis*, obtenu par un processus d'extraction spécifique, a été intégré à la formulation sous deux modalités distinctes : une forme libre et une forme microencapsulée. La méthode de microencapsulation a été mise en œuvre en utilisant des cellules de levure (qu'elles soient intactes ou plasmolysées) en tant que vecteurs biologiques. Cette approche technologique a pour objectif premier d'optimiser la stabilité et la biodisponibilité des polyphénols, tout en assurant une libération contrôlée des composés bioactifs et en minimisant les répercussions négatives sur le profil organoleptique du produit final.

Les concentrations d'incorporation de l'extrait de *Laurus nobilis* (0,02 %, 0,03 % et 0,05 % m/m) ont été choisies sur la base des données de la littérature concernant l'utilisation d'extraits végétaux riches en polyphénols dans les matrices alimentaires. Ces teneurs ont été retenues afin de garantir la sécurité d'utilisation de l'extrait, en évitant d'éventuels effets toxicologiques associés à des doses élevées, tout en limitant les altérations sensorielles indésirables, telles que l'amertume, l'astringence ou les modifications de texture susceptibles

d'affecter l'acceptabilité du produit par le consommateur (Robertson *et al.,* 2016 ; Castillejo et *al.,* 2018 ; Kumar *et al.,* 2018 ; Lafarga, 2019 ; Lucas *et al.,* 2020; Paternina *et al.,* 2022).

4.3. Quantification des composés phénoliques et évaluation de l'activité antioxydante

Afin de quantifier les composés phénoliques et d'évaluer l'activité antioxydante de la viande végétale, 100 g de chaque échantillon cru ont été prélevés, incluant les formulations enrichies en extrait libre et en extraits encapsulés à différentes concentrations, ainsi que l'échantillon témoin. Ces échantillons ont été extraits à l'aide de 100 mL d'éthanol à 96 %. Après agitation, les mélanges ont été centrifugés à 6000 tr/min pendant 15 min. Les surnageants issus des différentes formulations de viande végétale ont servi à la quantification des composés phénoliques totaux et à l'évaluation de l'activité antioxydante (Sánchez-Rangel *et al.,* 2013).

4.4.Détermination de la teneur en polyphénols totaux (TPC)

La teneur en polyphénols totaux (TPC) des extraits de la viande végétale a été déterminée par la méthode de Waterhouse (1999).

4.5.Détermination de la teneur en flavonoïdes totaux (TFC)

La teneur en flavonoïdes totaux (TFC) a été évaluée par une méthode de Chang *et al*. (2002).

4.6. Activité antioxydante

La capacité antioxydante des échantillons a été évaluée par la méthode du radical libre DPPH (2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle), selon Dangles *et al*. (1999), avec quelques modifications.

L'activité de piégeage des radicaux libres a été calculée selon l'équation suivante :

$$\boldsymbol{I}(\%) = \frac{(\boldsymbol{Ab} - \boldsymbol{As})}{\boldsymbol{Ab}} \times \mathbf{100}$$

Où : Ab : absorbance du blanc (solution DPPH seule) ;

As : absorbance de l'échantillon (extrait).

5. 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 en se référant aux méthodes officielles normalisées de l'Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 1984). Toutes les analyses ont été conduites en triplicat afin de garantir la reproductibilité et la fiabilité des résultats obtenus.

5.1.Activité de l'eau (aw)

L'activité de l'eau (aw) des échantillons a été déterminée à l'aide d'un hygromètre

AquaLab (Decagon Devices, Inc., série 4TE), en utilisant une solution standard d'activité de l'eau de 0,760, à une température constante de 25 °C. Cet appareil fonctionne selon la technique du point de rosée à miroir refroidi, où la température de rosée correspond à celle à laquelle la vapeur d'eau en équilibre avec le produit commence à se condenser. Cette condensation est induite sur un miroir métallique refroidi soit par circulation d'un liquide, soit par effet Peltier. Les échantillons ont été placés dans un cylindre en plastique de 1 cm de hauteur et de 4 cm de diamètre, puis introduits dans la chambre de mesure de l'appareil. Après calibration du capteur, les mesures ont été réalisées.

5.2.pH

La détermination du pH a été réalisée en homogénéisant 2 g de chaque échantillon de viande végétale dans 20 mL d'eau distillée à 25 °C, afin d'obtenir un extrait. Le pH a ensuite été mesuré à l'aide d'un pH-mètre numérique (Hanna Instruments, HI2211 pH/ORP Meter), muni d'une électrode de pénétration et d'une sonde de température. Avant les mesures, l'appareil a été étalonné à l'aide de solutions tampons de pH 4, 7 et 9, puis les valeurs de pH des échantillons ont été relevées.

5.3.Extrait sec soluble (°Brix)

La détermination de l'extrait sec soluble (°Brix) a été effectuée en homogénéisant 2 g de chaque échantillon de viande végétale dans 20 mL d'eau distillée afin d'obtenir un extrait. La mesure du °Brix a ensuite été réalisée à l'aide d'un réfractomètre manuel (Atago HHR-2N Humidité).

5.4.Humidité (H%)

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

$$\boldsymbol{H}\ (\%) = \frac{(\boldsymbol{P1} - \boldsymbol{P2}) - \boldsymbol{P}}{\boldsymbol{P2}} \times \mathbf{100}$$

Où : **H (%)** : humidité exprimée en pourcentage massique ;

$\mathbf{p_1}$: poids de la capsule (g) ;

$\mathbf{p_2}$: poids de l'échantillon prélevé (g) ;

p : poids de la capsule contenant l'échantillon après chauffage (g).

5.5.La teneur en cendres

La teneur en cendres totales a été déterminée par incinération des échantillons dans un four à moufle maintenu à 600 °C pendant 6 heures. L'échantillon destiné à la calcination a été

soigneusement pesé dans un creuset propre, préalablement séché et taré. Le creuset a ensuite été introduit dans le four pour l'étape d'incinération. Après refroidissement complet dans un dessiccateur, il a été de nouveau pesé. L'expression des résultats a été réalisée à partir du calcul selon la formule suivante :

$$\boldsymbol{Teneur\ en\ cendres}\ (\%) = \frac{\boldsymbol{M2 - T}}{\boldsymbol{M1}} \times \mathbf{100}$$

Où : **T :** tare du creuset (g) ;

M_1 : poids de l'échantillon sec (g) ;

M_2 : masse du creuset contenant les cendres après incinération (g).

6. Analyse des propriétés nutritionnelles

6.1.Teneur en protéines

La teneur en protéines brutes a été déterminée selon la méthode de Kjeldahl (AOAC, 2005), laquelle repose sur le dosage de l'azote total contenu dans l'échantillon. Cet azote est ensuite transformé en teneur en protéines grâce à un facteur de conversion propre à la matrice étudiée, généralement égal à 6,25 pour les produits alimentaires. Cette méthode se déroule en trois étapes essentielles :

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

Minéralisation

Dans un ballon de Kjeldahl propre et sec, 2 g d'échantillon sec ont été introduits, puis 15 mL d'acide sulfurique concentré (H_2SO_4) ont été ajoutés. Un mélange catalytique constitué de sulfate de potassium et de sulfate de cuivre a été incorporé afin d'accélérer la décomposition des composés organiques. Le mélange a ensuite été chauffé progressivement jusqu'à l'obtention d'une solution limpide présentant une coloration verdâtre, ce qui indique la fin de l'étape de minéralisation. Par la suite, le ballon a été laissé refroidir à température ambiante.

Distillation

Après refroidissement, 50 mL de soude concentrée (NaOH à 40 %) ont été ajoutés afin d'alcaliniser fortement le milieu et de favoriser ainsi la libération de l'ammoniac. Le ballon a ensuite été raccordé à un distillateur de type Kjeldahl. L'ammoniac volatilisé a été entraîné dans 50 mL d'une solution d'acide borique à 4 %, contenant quelques gouttes d'un mélange d'indicateurs colorés composé de rouge de méthyle et de bleu de bromothymol. Ce mélange

a permis 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 ainsi la récupération complète de l'ammoniac.

Titrage

Le distillat obtenu a été ensuite titré avec une solution d'acide chlorhydrique (HCl) 0,1 N, jusqu'à l'apparition d'un changement de couleur de l'indicateur, passant du vert au rose, ce qui correspond au point d'équivalence.

Calcul

L'azote total est calculé selon la formule suivante :

$$\boldsymbol{Azote\ N}\ (\%) = \frac{(\boldsymbol{V} \times \boldsymbol{N} \times \mathbf{14,01})}{\boldsymbol{m}} \times \mathbf{100}$$

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).

La teneur en protéines est ensuite obtenue par :

$$\%\boldsymbol{Prot\acute{e}ines} = \%\boldsymbol{Azote} \times \boldsymbol{facteur\ de\ conversion}$$

6.2. Teneur en lipides

La teneur en lipides a été déterminée par extraction Soxhlet (Soxhlet, 1879 ; AOAC, 2005), en utilisant l'éther éthylique comme solvant. Chaque échantillon a été pesé avec précision, puis introduit dans une capsule en cellulose (perméable aux solvants et aux lipides), à usage unique. L'extraction a été effectuée en continu à l'aide de l'éther éthylique porté à ébullition (point d'ébullition ≈ 35 °C), ce qui a permis la dissolution progressive des matières grasses présentes dans l'échantillon. Le solvant chargé en lipides a ensuite été acheminé vers le ballon d'extraction par des déversements successifs provoqués par un phénomène de siphonnage au niveau du coude latéral de l'appareil. Seul le solvant pouvait se revaporiser, permettant ainsi l'accumulation progressive de la matière grasse dans le ballon. Le cycle s'est répété jusqu'à extraction complète des lipides.

À la fin de l'extraction, le solvant a été évaporé à l'aide d'un évaporateur rotatif, puis la matière grasse résiduelle a été récupérée et pesée.

Calcul de la teneur en matière grasse :

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

$$\boldsymbol{Matière\ grasse}\ (\%) = \frac{(\boldsymbol{W2 - W1})}{\boldsymbol{W3}} \times \mathbf{100}$$

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).

6.3.Teneur en glucides

La teneur en glucides totaux a été estimée par un calcul indirect, en appliquant la formule proposée par Bertrand et Thomas (1910). Cette méthode est basée sur le principe de la différence, selon lequel les glucides correspondent à la fraction restante de l'échantillon après soustraction des principaux constituants analysés, à savoir : l'humidité, les protéines, les lipides ainsi que les cendres. La teneur en glucides totaux est exprimée conformément à l'équation suivante :

$$\%\ Glucides\ totaux\ =\ 100\ -\ (\%\ Humidité\ +\ \%\ Protéines\ +\ \%\ Lipides\ +\ \%\ Cendres)$$

6.4.Valeur calorique

La valeur énergétique des échantillons a été estimée par calcul, selon la méthode décrite par Coleman (1970), basée sur les coefficients d'Atwater et Rosa (1899). Cette méthode repose sur l'attribution de valeurs énergétiques standards aux macronutriments, à savoir : 4 kcal/g pour les protéines, 4 kcal/g pour les glucides totaux et 9 kcal/g pour les lipides. La valeur énergétique totale a été déterminée en additionnant les apports énergétiques de chacun de ces nutriments, conformément à la formule suivante :

$$E(kcal\ /\ 100g)\ =\ (4\ \times\ \%\ Protéines)\ +\ (4\ \times\ \%\ Glucides)\ +\ (9\ \times\ \%\ Lipides)$$

6.5.Analyse Sensorielle

L'analyse sensorielle des échantillons de viande végétale (témoin, enrichi en extrait libre et en extraits encapsulés à différentes concentrations) a été réalisée afin d'évaluer l'effet de la variation de concentration sur les caractéristiques sensorielles du produit final, au moyen d'un test hédonique. L'évaluation sensorielle a été effectuée par un panel de 30 dégustateurs non entraînés, âgés de20 à 40 ans, afin de se rapprocher des conditions réelles de consommation et d'obtenir une appréciation globale représentative. Les participants ont été informés des objectifs généraux du test et des modalités d'évaluation, sans divulgation de la nature des échantillons, afin de limiter les biais. Les échantillons ont été préparés dans des conditions standardisées garantissant leur comparabilité, avec une cuisson uniforme en termes

de température et de durée, puis découpés en portions homogènes et présentés dans des contenants identiques. Chaque échantillon a été codé à l'aide de numéros aléatoires afin d'assurer l'anonymat. L'analyse sensorielle a été menée selon une méthode hédonique visant à mesurer le degré d'acceptabilité des différentes formulations. Les attributs évalués comprenaient l'aspect visuel (apparence globale et couleur), l'odeur (intensité et typicité), les caractéristiques texturales (texture globale, fermeté, jutosité, granulosité, masticabilité et cohésion), la sensation en bouche, ainsi que la flaveur (goût global, perception salée et arrière-goût), en plus de l'acceptabilité globale. L'évaluation a été réalisée à l'aide d'une échelle hédonique structurée en neuf points, allant de 1 (« je n'aime pas du tout ») à 9 (« j'aime extrêmement »), permettant de quantifier le degré d'appréciation de chaque attribut. Les données recueillies ont ensuite été exploitées afin de comparer les différentes formulations et d'analyser l'influence des concentrations sur les caractéristiques sensorielles ainsi que sur l'acceptabilité globale des produits étudiés.

7. 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.

Résultats et discussion

1. Teneurs en polyphénols totaux

1.1.Effet de l'encapsulation sur la teneur en polyphénols totaux de *Laurus nobilis*

La teneur en composés phénoliques totaux de l'extrait de *Laurus nobilis* et des microcapsules obtenues a été évaluée. Les résultats sont présentés dans **la figure 12.**

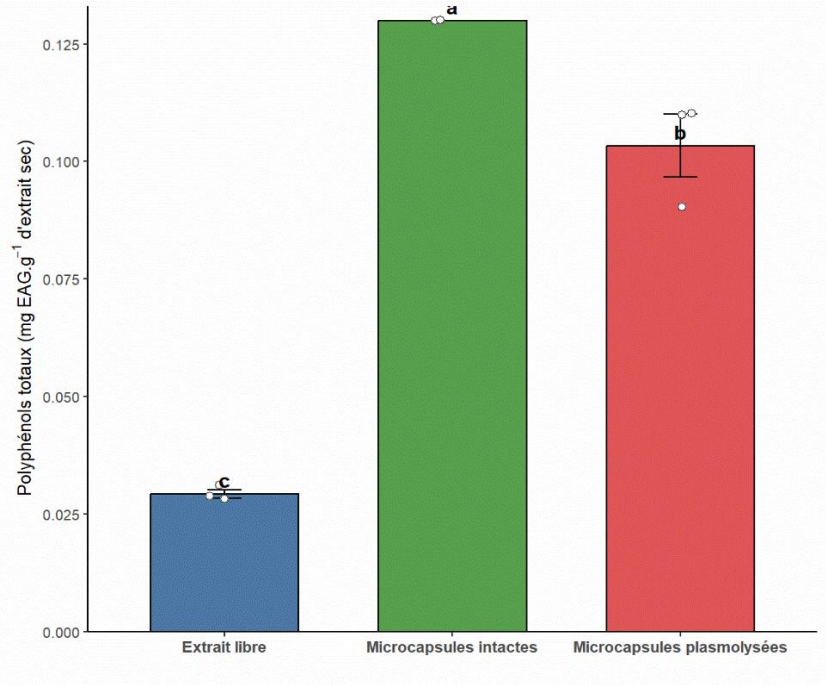


Figure 12. Teneur en polyphénols totaux de l'extrait de *Laurus nobilis.*

Les résultats obtenus révèlent des différences significatives ($p < 0,05$) entre les trois systèmes d'enrichissement étudiés. Les extraits encapsulés dans des cellules de levure intactes présentent la teneur en polyphénols totaux la plus élevée (0,1323 ± 0,0022 mg EAG/g d'extrait sec), suivis des extraits encapsulés dans des cellules plasmolysées (0,1064 ± 0,0128 mg EAG/g d'extrait sec), tandis que l'extrait libre affiche la valeur la plus faible (0,0301 ± 0,0013 mg EAG/g d'extrait sec). Cette hiérarchie met clairement en évidence l'effet bénéfique de l'encapsulation sur la préservation des composés phénoliques, ainsi que l'influence déterminante de l'état structural des cellules de levure utilisées comme vecteurs d'encapsulation.

L'augmentation marquée des teneurs en polyphénols observée dans les systèmes encapsulés par rapport à l'extrait libre confirme l'efficacité de l'encapsulation pour protéger les composés bioactifs contre les différents facteurs de dégradation rencontrés lors de la transformation et du stockage des aliments. En effet, les polyphénols sont particulièrement sensibles aux

réactions d'oxydation, à l'exposition à la lumière, à l'humidité ainsi qu'aux Interactions avec les constituants de la matrice alimentaire, ce qui peut entraîner une diminution importante de leur stabilité et de leur biodisponibilité. L'encapsulation agit ainsi comme une barrière physique limitant ces phénomènes de dégradation et favorisant une meilleure rétention des molécules phénoliques au sein du système alimentaire (Bińkowska *et al.,* 2024).

Les performances supérieures observées pour les extraits encapsulés dans des cellules intactes suggèrent que l'intégrité de la paroi cellulaire joue un rôle essentiel dans la protection des composés phénoliques. La structure tridimensionnelle préservée de la cellule de levure constitue une enveloppe naturelle capable de limiter les échanges avec le milieu extérieur et de réduire l'exposition des molécules encapsulées aux agents pro-oxydants. Cette observation est en accord avec les travaux de Semouma *et al.* (2024), qui ont montré que les cellules de levure intactes assurent une meilleure conservation des composés bioactifs grâce à leur capacité à former une barrière protectrice efficace. De même, Cvetković *et al.* (2020) ont rapporté que les systèmes d'encapsulation basés sur des cellules de levure intactes permettent d'améliorer la stabilité des substances actives tout en réduisant les pertes liées aux phénomènes de dégradation chimique.

Bien que les extraits encapsulés dans des cellules plasmolysées présentent des teneurs en polyphénols inférieures à celles obtenues avec les cellules intactes, leurs valeurs demeurent nettement supérieures à celles de l'extrait libre. Cette situation traduit l'existence d'un effet protecteur partiel associé à la plasmolyse. En effet, le traitement de plasmolyse modifie la structure membranaire et augmente la porosité cellulaire, favorisant l'incorporation des composés phénoliques mais réduisant simultanément l'efficacité de leur confinement au sein de la cellule. Cette altération structurelle peut faciliter les phénomènes de diffusion et de fuite des molécules bioactives vers le milieu environnant, ce qui explique les teneurs plus faibles observées par rapport aux cellules intactes. Des observations similaires ont été rapportées par Ranitović *et al.* (2020), qui ont montré que la désorganisation partielle des membranes cellulaires après plasmolyse diminue la capacité protectrice des levures vis-à-vis des composés encapsulés.

À l'inverse, les faibles teneurs enregistrées pour l'extrait libre témoignent de l'absence de mécanisme de protection contre les contraintes environnementales. En l'absence d'une matrice encapsulante, les polyphénols demeurent directement exposés aux phénomènes d'oxydation, aux réactions avec les constituants alimentaires et aux conditions de

Transformation, ce qui favorise leur dégradation et réduit leur stabilité au cours du temps. Ces résultats concordent avec ceux de Stelmasiak *et al.* (2024), qui ont souligné la forte vulnérabilité des composés phénoliques non encapsulés et leur diminution rapide dans les systèmes alimentaires complexes.

Par ailleurs, l'écart observé entre les systèmes encapsulés et l'extrait libre met en évidence la capacité des cellules de levure à agir non seulement comme support de transport, mais également comme système de conservation des molécules bioactives. La composition de la paroi cellulaire, riche en β-glucanes, mannoprotéines et chitine, contribue vraisemblablement à la stabilisation des composés phénoliques par l'établissement d'interactions physicochimiques limitant leur dégradation. Ces mécanismes pourraient expliquer la meilleure rétention des polyphénols observée dans les formulations encapsulées.

Ces résultats démontrent que l'encapsulation constitue une stratégie technologique particulièrement efficace pour améliorer la stabilité des composés phénoliques du laurier incorporés dans les formulations de viande végétale sans gluten. Les cellules de levure, notamment lorsqu'elles conservent leur intégrité structurale, apparaissent comme des vecteurs naturels prometteurs pour la protection et la valorisation des extraits végétaux. Cette approche permet non seulement de préserver les teneurs en polyphénols, mais également de maintenir le potentiel fonctionnel et antioxydant des ingrédients bioactifs, conformément aux observations rapportées par Dobroslavić *et al.* (2023).

1.2. Effet de l'enrichissement des viandes végétales en extraits libres et encapsulés de *Laurus nobilis* sur la teneur en polyphénols totaux

Le tableau 4 présente la teneur en polyphénols totaux de l'extrait de laurier sous forme libre, ainsi que sous forme encapsulée dans des cellules intactes et des cellules plasmolysées, à différentes concentrations. Les valeurs sont exprimées en moyenne ± écart-type (mg EAG/g d'extrait sec).

Tableau 4. Effet de l'enrichissement par l'extrait libre et les extraits encapsulés sur la teneur en polyphénols totaux des formulations étudiées.

Traitement	Concentration (%)	Polyphénols totaux (mg EAG/g d'extrait sec)
Témoin	–	$1{,}81 \pm 0{,}04^{a}$
Témoin + cellules de levure intactes (sans extrait)	–	$2{,}12 \pm 0{,}15^{b}$
Témoin + cellules de levure plasmolysées (sans extrait)	–	$1{,}26 \pm 0{,}14^{c}$

Extrait libre	0,02	2,24 ± 0,14^{b}
	0,03	13,30 ± 2,39^{d}
	0,05	1,49 ± 0,13^{c}
Extrait encapsulé dans des cellules intactes	0,02	2,25 ± 0,09^{b}
	0,03	1,87 ± 0,09^{ab}
	0,05	1,99 ± 0,07^{b}
Extrait encapsulé dans des cellules plasmolysées	0,02	2,25 ± 0,09^{b}
	0,03	1,20 ± 0,03^{c}
	0,05	1,14 ± 0,24^{c}

Les valeurs sont exprimées en moyenne ± écart-type (n = 3). Les moyennes suivies de lettres différentes sont significativement différentes (p < 0,05).

Les résultats relatifs à la teneur en polyphénols totaux des formulations de viande végétale sans gluten enrichies en extrait de laurier montrent l'existence de différences statistiquement significatives entre les différentes formulations étudiées ($p < 0,05$). Parmi celles-ci, la formulation contenant 0,03 % d'extrait libre présente la teneur en polyphénols la plus élevée, avec une valeur de 13,305 ± 2,393 mg EAG/g d'extrait sec. En revanche, le témoin ainsi que les formulations contenant 0,02 % et 0,05 % d'extrait libre affichent des teneurs nettement plus faibles, respectivement de 1,805 ± 0,044, 2,248 ± 0,146 et 1,492 ± 0,133 mg EAG/g d'extrait sec. Ces résultats suggèrent que l'effet de la concentration d'extrait sur la teneur finale en polyphénols n'est pas linéaire, mais dépend d'un équilibre entre la quantité incorporée et la disponibilité réelle des composés phénoliques au sein de la matrice alimentaire.

L'analyse des formulations enrichies par des microcapsules révèle également des variations en fonction du type de microencapsulation utilisé. Pour les formulations enrichies par des microcapsules obtenues à partir de cellules de levure intactes, la concentration de 0,02 % présente la teneur moyenne la plus élevée en polyphénols totaux, soit 2,257 ± 0,094 mg EAG/g d'extrait sec. Une tendance similaire est observée pour les formulations enrichies par des microcapsules issues de cellules plasmolysées, où la valeur maximale est également obtenue à 0,02 %, avec 2,245 ± 0,152 mg EAG/g d'extrait sec. Toutefois, ces valeurs demeurent largement inférieures à celle observée pour la formulation contenant 0,03 % d'extrait libre. Ce résultat indique que, dans les conditions expérimentales de cette étude, la microencapsulation n'a pas conduit à une augmentation immédiate de la teneur apparente en polyphénols.

Ces observations diffèrent de celles rapportées par Semouma *et al*. (2026), qui ont montré que la microencapsulation dans des cellules de levure, en particulier intactes, améliore significativement la rétention des composés phénoliques grâce au rôle protecteur de la paroi

cellulaire contre l'oxydation et la dégradation. Cette divergence pourrait s'expliquer par la nature spécifique de la matrice de viande végétale sans gluten utilisée dans la présente étude. En effet, les interactions entre les composés phénoliques, les protéines végétales et les polysaccharides présents dans la matrice peuvent influencer leur extractibilité et donc leur quantification analytique. Il est également probable que la microencapsulation ait retardé la libération des polyphénols lors de l'étape d'extraction, conduisant ainsi à des teneurs mesurées plus faibles malgré une meilleure protection structurale.

La teneur particulièrement élevée observée pour la formulation contenant 0,03 % d'extrait libre suggère qu'à cette concentration, les composés phénoliques atteignent un niveau optimal de dispersion et de solubilisation dans la matrice alimentaire. Une concentration intermédiaire pourrait ainsi favoriser une meilleure distribution des molécules bioactives tout en limitant les interactions défavorables avec les macromolécules du système. Des résultats comparables ont été rapportés par Bińkowska *et al.* (2024), qui ont montré qu'une concentration modérée en composés bioactifs favorise généralement leur disponibilité maximale avant l'apparition de phénomènes limitants.

À l'inverse, la diminution observée pour la formulation contenant 0,05 % d'extrait peut être interprétée comme un effet de saturation de la matrice alimentaire. À des concentrations élevées, les polyphénols sont susceptibles d'interagir davantage avec les protéines végétales via des liaisons hydrogène ou des interactions hydrophobes, ce qui peut réduire leur solubilité et leur extractibilité. De plus, une concentration excessive peut favoriser une dispersion hétérogène ou une agglomération des microcapsules lorsqu'elles sont présentes. Ce phénomène a également été décrit par Plášková *et al.* (2023), qui ont souligné qu'un excès de composés bioactifs peut diminuer l'efficacité fonctionnelle des formulations enrichies.

En ce qui concerne les formulations enrichies par des microcapsules, la concentration de 0,02 % semble représenter la condition la plus stable, aussi bien pour les microcapsules obtenues à partir de cellules intactes que pour celles issues de cellules plasmolysées. Cela suggère qu'à faible concentration, la structure encapsulante conserve une intégrité suffisante pour assurer une protection efficace des composés phénoliques. Cependant, la diminution observée dans certaines formulations pourrait refléter une saturation partielle du système encapsulant ou des interactions physicochimiques défavorables entre les microcapsules et les constituants de la matrice alimentaire. Ces interactions peuvent fragiliser la structure des capsules et limiter leur capacité protectrice (Grgić *et al*., 2020).

Par ailleurs, la variabilité relativement élevée observée pour la formulation contenant 0,03 %

d'extrait libre suggère une certaine hétérogénéité du système. Cette variabilité pourrait être liée à une distribution non homogène de l'extrait dans la matrice ou à des différences locales dans les interactions entre les polyphénols et les constituants alimentaires. Ce comportement est cohérent avec les observations de Solomando *et al.* (2019), qui ont montré que la complexité structurale des matrices alimentaires influence fortement la distribution spatiale des composés bioactifs.

Les résultats obtenus montrent que l'efficacité de l'incorporation des extraits de laurier dépend non seulement de la concentration appliquée, mais également du mode de formulation et des interactions établies avec la matrice alimentaire. Bien que la microencapsulation soit reconnue pour améliorer la stabilité des composés phénoliques au cours du stockage, de la transformation et de la digestion, les résultats de cette étude indiquent qu'elle ne conduit pas systématiquement à une augmentation immédiate de leur disponibilité analytique (Dobroslavić *et al.*,2023).

2. Teneur en flavonoïdes

2.1.Effet de l'encapsulation sur la teneur en flavonoides totaux de *Laurus nobilis*

La teneur en flavonoïdes de l'extrait de *Laurus nobilis* a été déterminée. Les résultats sont présentés dans **la figure 13.**

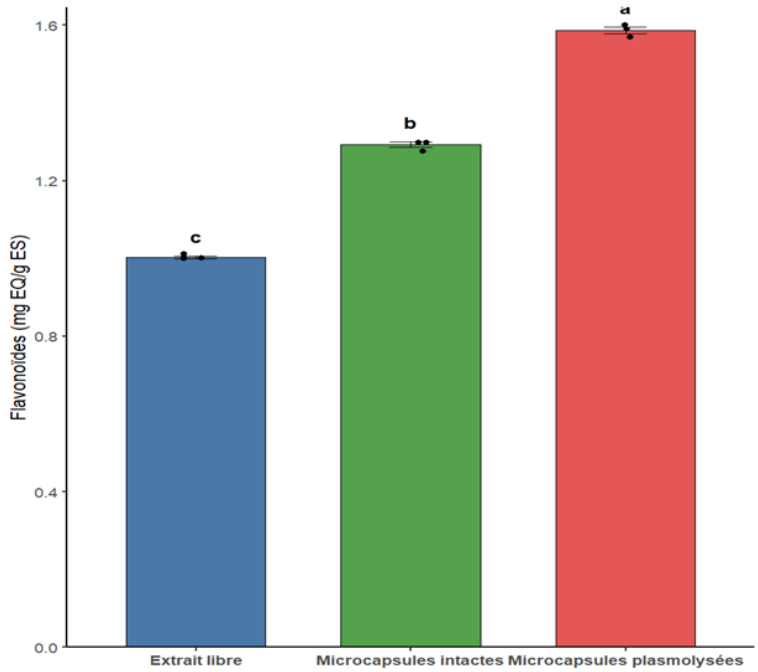


Figure 13. Teneur en flavonoides totaux de l'extrait de *Laurus nobilis*

Les résultats obtenus mettent en évidence une différence significative ($p < 0,05$) entre

les différents traitements étudiés concernant la teneur en flavonoïdes. L'analyse descriptive révèle que l'extrait encapsulé dans des cellules de levure plasmolysées présente la teneur la plus élevée (1,593 ± 0,020 mg EQ/g d'extrait sec), suivi de l'extrait encapsulé dans des cellules intactes (1,295 ± 0,011 mg EQ/g d'extrait sec), tandis que l'extrait libre enregistre la valeur la plus faible (1,008 ± 0,004 mg EQ/g d'extrait sec). Cette distribution met en évidence une structuration hiérarchique nette entre les traitements, traduisant l'effet positif de l'encapsulation sur la conservation des flavonoïdes.

La comparaison entre les deux systèmes encapsulés montre des performances différenciées selon l'état structural de la matrice biologique. Les cellules plasmolysées présentent des teneurs significativement supérieures à celles des cellules intactes, indiquant que la modification de l'intégrité cellulaire influence directement la capacité de chargement et de rétention des composés flavonoïdiques. Contrairement à certains systèmes d'encapsulation où l'intégrité de la paroi constitue un facteur déterminant de protection, les résultats observés suggèrent ici une meilleure efficacité des structures partiellement altérées, traduisant un comportement spécifique du système à base de levure. Dans tous les cas, l'extrait libre demeure systématiquement inférieur aux deux formes encapsulées, confirmant l'efficacité globale du procédé. Ces résultats peuvent être expliqués par le rôle de la matrice cellulaire de levure en tant que système de protection et de vectorisation des composés bioactifs. La microencapsulation limite les phénomènes de dégradation des flavonoïdes, notamment l'oxydation, la photodégradation et les effets thermiques, contribuant ainsi à une meilleure préservation des composés actifs. Ce mécanisme justifie les teneurs globalement plus élevées observées dans les systèmes encapsulés et confirme l'intérêt technologique de cette approche pour la stabilisation des extraits végétaux dans les matrices alimentaires fonctionnelles (Elahedadkhodazade *et al.*, 2021).

La supériorité des cellules plasmolysées peut être attribuée aux modifications structurales induites par la plasmolyse, lesquelles augmentent la perméabilité de la paroi cellulaire et facilitent la pénétration des flavonoïdes au sein de la matrice levurienne. Cette configuration favorise ainsi une meilleure incorporation et rétention des composés. À l'inverse, l'intégrité structurale des cellules intactes constitue une barrière partielle limitant la diffusion des molécules bioactives, ce qui explique leurs performances légèrement inférieures. Ce comportement met en évidence l'importance des propriétés physico-structurales de la matrice biologique dans l'efficacité du système d'encapsulation (Chernenko, 2025).

2.2.Effet de l'enrichissement des viandes végétales en extraits libres et encapsulés de *Laurus nobilis* sur la teneur en flavonoïdes

Le tableau 5 suivant présente les résultats de la teneur en flavonoïdes des différents enrichissements de viande végétale enrichies en extrait de laurier sous forme libre, encapsule intact, encapsule dans des cellules plasmolysées. Les valeurs sont exprimées en moyenne ± écart-type

Tableau 5. Teneur en flavonoïdes (mg EQ/g d'extrait sec) des formulations enrichies en extrait libre et en extraits encapsulés (cellules intactes et plasmolysées)

Échantillon	Concentration (%)	Teneur en flavonoïdes (mg EQ/g d'extrait sec)
Témoin	—	$0,69 \pm 0,51^{de}$
Extrait encapsulé (cellules intactes) – témoin	—	$1,18 \pm 0,22^{b}$
Extrait encapsulé (cellules plasmolysées) – témoin	—	$0,96 \pm 0,07^{c}$
Extrait libre	0,02	$0,75 \pm 0,58^{cd}$
	0,03	$0,69 \pm 0,33^{de}$
	0,05	$1,22 \pm 0,10^{ab}$
Extrait encapsulé (cellules intactes)	0,02	$1,16 \pm 0,19^{b}$
	0,03	$1,12 \pm 0,004^{bc}$
	0,05	$1,18 \pm 0,19^{b}$
Extrait encapsulé (cellules plasmolysées)	0,02	$1,04 \pm 0,03^{bc}$
	0,03	$1,24 \pm 0,02^{ab}$
	0,05	$1,61 \pm 0,003^{ab}$

Les différences significatives entre les échantillons ont été évaluées par le test de Tukey, les lettres différentes indiquant des différences statistiquement significatives ($p < 0,05$).

Les résultats mettent en évidence une variation des teneurs en flavonoïdes en fonction du mode d'enrichissement et de la concentration de l'extrait de laurier. Les formulations enrichies en extrait libre présentent une augmentation modérée des teneurs, avec une valeur maximale observée à 0,05 % (1,22 ± 0,10 mg EQ/g), tandis que les concentrations inférieures restent proches du témoin (0,69 ± 0,33 à 0,75
± 0,58 mg EQ/g). Ce comportement suggère une disponibilité limitée des flavonoïdes à faible dose, probablement liée à des interactions avec la matrice végétale sans gluten, réduisant leur extractibilité.

Les formulations enrichies en extrait encapsulé présentent globalement des teneurs plus élevées que celles enrichies en extrait libre, confirmant l'effet protecteur des matrices de levure utilisées pour l'encapsulation. Les formulations contenant des cellules intactes montrent des valeurs relativement stables (1,12–1,18 mg EQ/g), sans effet marqué de la concentration, indiquant une libération progressive et homogène des composés bioactifs. Ce comportement est cohérent avec le rôle barrière de la matrice levurienne, limitant les phénomènes de dégradation (Jamshaid Qazi *et al.,* 2024).
En revanche, les formulations enrichies en cellules plasmolysées présentent une réponse plus dépendante de la concentration, avec une valeur maximale observée à 0,05 % (1,61 ± 0,003 mg EQ/g). Cette augmentation peut être attribuée à l'augmentation de la perméabilité cellulaire induite par la plasmolyse, favorisant une meilleure accessibilité et diffusion des flavonoïdes au sein de la matrice alimentaire.

La comparaison globale met en évidence une supériorité des formulations enrichies en extrait encapsulé par rapport à celles enrichies en extrait libre, en particulier à forte concentration, confirmant l'intérêt technologique de la microencapsulation pour la stabilisation des flavonoïdes dans des matrices alimentaires complexes. Les différences observées peuvent être liées à des interactions entre les flavonoïdes et les composants de la matrice (protéines et polysaccharides), limitant leur disponibilité dans les formulations non encapsulées (Dobroslavić *et al.,* 2023).

La variabilité plus élevée observée dans les formulations enrichies en extrait libre reflète une instabilité et une hétérogénéité de distribution des composés, contrairement aux formulations encapsulées qui assurent une meilleure homogénéité et reproductibilité. Ces résultats sont en accord avec Fang *et al.* (2010), qui ont montré que les systèmes d'encapsulation améliorent la stabilité et la dispersion des composés bioactifs dans les matrices alimentaires.

Enfin, l'efficacité accrue observée à 0,05 % confirme l'existence d'un seuil de concentration au-delà duquel l'effet d'enrichissement devient significatif, particulièrement dans les formulations contenant des cellules plasmolysées, où la structure modifiée améliore la libération des flavonoïdes. Ces observations sont cohérentes avec les travaux rapportant l'intérêt des matrices biologiques encapsulantes pour la protection et la stabilisation des composés phénoliques (Mehta *et al.,* 2022 ; Zabot *et al.,* 2022 ; Domínguez *et al.,* 2021 ; Dobroslavić *et al.,* 2023).

3.Activité antioxydante

3.1.Effet de l'encapsulation sur l'activité antioxydante de l'extrait de *Laurus nobilis*

L'effet de l'encapsulation sur l'activité antioxydante de l'extrait de *Laurus nobilis* a été évalué par le test de piégeage du radical 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle (DPPH). Cette activité a été mesurée pour l'extrait libre ainsi que pour les extraits encapsulés dans des cellules de levure intactes et plasmolysées. Les résultats, exprimés en pourcentage d'inhibition du radical DPPH (moyenne ± écart-type), sont présentés dans **la Figure 14.**

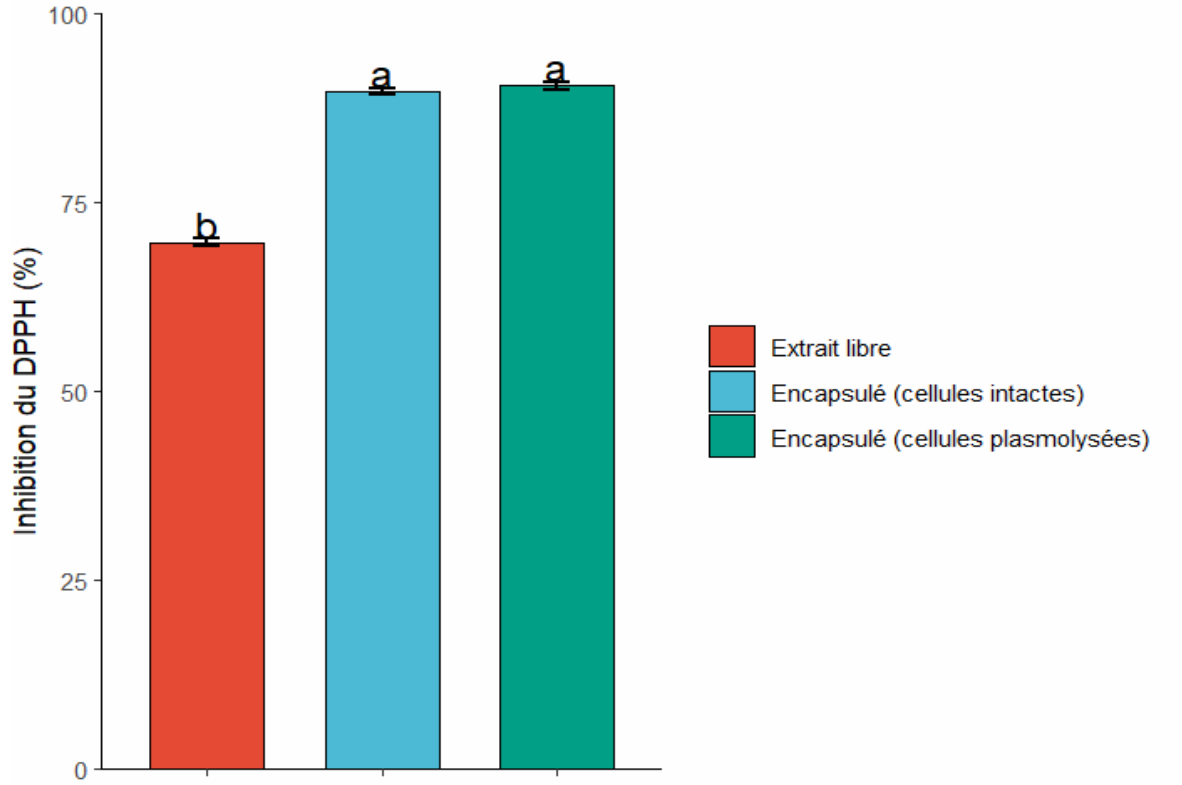


Figure 14. Effet de l'encapsulation sur l'activité antioxydante de l'extrait de *Laurus nobilis*

Les résultats obtenus mettent en évidence l'effet significatif de l'encapsulation des extraits de laurier sur le pourcentage évalué dans les différents enrichissements de viande végétale sans gluten. D'un point de vue descriptif et statistique, l'analyse montre que les traitements encapsulés, qu'ils soient dans de cellules intacts ou cellules plasmolysées, présentent des valeurs significativement plus élevées que l'extrait libre ($p < 0,05$) (ShokriTometri *et al*, 2020), ce qui indique une nette amélioration globale des performances des systèmes encapsulés par rapport au composé non protégé.

En termes de description des résultats, l'extrait non encapsulé a enregistré la valeur moyenne la plus faible (69,70 ± 0,44 %), ce qui traduit une faible stabilité des composés bioactifs dans

la matrice alimentaire. Cette diminution peut être expliquée par la grande sensibilité des composés phénoliques du laurier aux conditions environnementales telles que l'oxydation, la température ou les interactions avec les constituants de la matrice alimentaire. En absence de protection, ces composés subissent des pertes importantes, ce qui réduit leur efficacité technologique et fonctionnelle (Dobroslavić *et al*, 2020).

En comparaison, les enrichissements contenant l'extrait encapsulé présentent des performances nettement supérieures par rapport aux autres traitements, avec des valeurs de 89,85 ± 0,96 % pour la forme encapsulée intacte et de 90,01 ± 0,08 % pour la forme encapsulée dans des cellules plasmolysées. Ces résultats montrent des niveaux très proches entre les deux systèmes d'encapsulation.

Cette proximité des valeurs indique clairement l'absence de différence significative entre les cellules encapsulées intact et les cellules encapsulées plasmolysées. Ainsi, les deux procédés d'encapsulation assurent une efficacité comparable en ce qui concerne la protection et la rétention des composés bioactifs du laurier dans la matrice alimentaire.

Dans une logique de discussion, ces résultats suggèrent que la microencapsulation constitue une stratégie technologique efficace pour améliorer la stabilité des composés bioactifs dans la matrice végétale sans gluten (Dobroslavić *et al*, 2023). L'amélioration observée peut être attribuée au rôle protecteur de l'enrobage microencapsulant, qui limite la dégradation des molécules actives et favorise leur meilleure rétention au sein du système alimentaire.

Par ailleurs, la légère supériorité observée pour l'enrichissement des cellules plasmolysées peut être expliquée par une modification de la perméabilité cellulaire après plasmolyse, facilitant l'incorporation ou la libération des composés d'intérêt. Toutefois, cette différence reste statistiquement non significative, ce qui confirme que les deux systèmes

Ces résultats confirment l'intérêt technologique de l'encapsulation dans la valorisation des extraits de laurier destinés aux produits végétaux sans gluten. Cette approche permet non seulement de préserver les propriétés fonctionnelles des composés bioactifs, mais également d'améliorer la qualité, la stabilité et le potentiel fonctionnel des formulations alimentaires innovantes (Xu *et al*, 2024).

3.2.Effet de l'enrichissement des viandes végétales en extraits libres et encapsulés de *Laurus nobilis* sur l'activité antioxydante

L'activité antioxydante des formulations de viande végétale sans gluten enrichies en extrait de laurier (*Laurus nobilis*) libre ou microencapsulé a été évaluée par le test de piégeage du

radical DPPH. Les résultats, exprimés en pourcentage d'inhibition du radical DPPH sous forme de moyenne ± écart-type, sont présentés dans le Tableau 6.

Tableau 6. Activité antioxydante (inhibition du radical DPPH, %) des formulations de viande végétale sans gluten enrichies en extrait de laurier libre ou microencapsulé

Mode de formulation	Concentration (%)	Inhibition du radical DPPH (%)
Extrait libre	Témoin	53,48 ± 3,96^{e}
	0,02	63,25 ± 1,58^{d}
	0,03	35,77 ± 4,22^{f}
	0,05	78,53 ± 0,11^{c}
Extrait encapsulé dans des cellules de levure intactes	Témoin	85,95 ± 0,05^{b}
	0,02	91,35 ± 0,21^{a}
	0,03	90,85 ± 0,08^{a}
	0,05	90,30 ± 0,20^{a}
Extrait encapsulé dans des cellules de levure plasmolysées	Témoin	80,66 ± 0,44^{c}
	0,02	93,21 ± 0,02^{a}
	0,03	50,11 ± 3,11^{e}
	0,05	13,33 ± 6,26^{g}

Les valeurs sont exprimées en moyenne ± écart-type (n = 3). Les lettres différentes (a–g) dans la même colonne indiquent des différences significatives selon le test de Tukey après ANOVA à un seuil de $p < 0,05$

L'activité antioxydante mesurée par le test DPPH a été significativement influencée par le mode de formulation de l'extrait de laurier ainsi que par la concentration incorporée ($p < 0,05$), indiquant une modulation importante de la capacité de piégeage radicalaire selon les conditions expérimentales. L'analyse comparative des extraits libres et microencapsulés met en évidence des comportements fonctionnels distincts, suggérant des mécanismes différents de protection, de libération et d'interaction avec la matrice de viande végétale sans gluten.

Les formulations enrichies en extrait libre présentent une réponse dose-effet non linéaire. Bien qu'une augmentation de l'activité antioxydante soit observée à 0,02 %, une diminution marquée apparaît à 0,03 %, suivie d'une augmentation significative à 0,05 %, où l'activité maximale de cette série est atteinte. Cette réponse non monotone suggère que l'augmentation de la concentration en composés phénoliques n'entraîne pas systématiquement une amélioration du

pouvoir antioxydant. Ce comportement pourrait être attribué à des interactions moléculaires entre les polyphénols du laurier et les macromolécules de la matrice, notamment les protéines végétales et les fibres, susceptibles de réduire l'accessibilité des groupements hydroxyles responsables du piégeage des radicaux libres. Des interactions polyphénols–protéines similaires ont été rapportées comme facteur limitant l'activité antioxydante apparente dans des matrices alimentaires complexes. (Lu & Guo, 2024 ; Sun & Sarteshnizi, 2024).

À l'inverse, les formulations enrichies par des microcapsules obtenues à partir de cellules de levure intactes présentent une activité antioxydante élevée et remarquablement stable sur l'ensemble des concentrations testées. L'absence de différence statistiquement significative entre les formulations microencapsulées indique que l'augmentation de la concentration n'altère pas significativement la capacité antiradicalaire lorsque l'extrait est protégé par une enveloppe cellulaire intacte. Cette stabilité fonctionnelle suggère une protection efficace des composés bioactifs contre les mécanismes de dégradation oxydative. (Tincu-Atanase *et al,* 2021).

Cette performance peut être expliquée par l'intégrité structurale de la paroi cellulaire de *Saccharomyces cerevisiae*, constituée principalement de β-glucanes, de mannoprotéines et de chitine. Cette architecture confère à la cellule un rôle de barrière semi-perméable capable de limiter simultanément l'oxydation des polyphénols et leur diffusion prématurée vers le milieu externe. Par conséquent, les molécules bioactives conservent une stabilité élevée tout en assurant une libération progressive compatible avec le maintien d'une forte activité antioxydante (Dobroslavić *et al.,* 2023 ; Bińkowska *et al.*,2024).

Les formulations enrichies par des microcapsules issues de cellules plasmolysées présentent un comportement radicalement différent. Une activité antioxydante maximale est observée à faible concentration (0,02 %), dépassant l'ensemble des autres formulations. Cependant, une chute drastique est enregistrée lorsque la concentration augmente, avec une diminution particulièrement marquée à 0,05
%. Ce profil suggère l'existence d'un seuil critique au-delà duquel la structure plasmolysée ne parvient plus à maintenir la stabilité des composés encapsulés.

La plasmolyse modifie profondément l'organisation membranaire et augmente la perméabilité cellulaire. À faible concentration, cette perméabilité accrue peut favoriser la libération rapide des polyphénols et maximiser leur interaction avec le radical DPPH. En revanche, à concentration élevée, elle peut induire une diffusion incontrôlée des composés bioactifs, une instabilité colloïdale ou une agglomération des microcapsules, réduisant ainsi leur dispersion

dans la matrice. En parallèle, l'augmentation de la concentration peut favoriser la formation de complexes polyphénols–protéines ou polyphénols–fibres, diminuant la fraction bioaccessible des antioxydants. (Laib *et al*, 2026).

La forte diminution observée aux concentrations élevées pourrait également refléter une transition vers un comportement pro-oxydant. Certains polyphénols, lorsqu'ils dépassent une concentration critique, peuvent subir des réactions d'auto-oxydation générant des espèces réactives de l'oxygène, ce qui réduit leur effet antiradicalaire net. (Zapadka *et al.*,2017).

Les résultats obtenus démontrent que l'activité antioxydante des formulations enrichies en extrait de laurier est gouvernée par l'interaction entre concentration, mode de microencapsulation et microstructure de la matrice alimentaire. L'encapsulation dans des cellules de levure intactes apparaît comme la stratégie la plus robuste pour préserver durablement le potentiel antioxydant, tandis que les cellules plasmolysées n'offrent un bénéfice fonctionnel qu'à faible concentration. Ces observations soulignent l'importance d'une optimisation simultanée du système encapsulant et de la charge en extrait pour maximiser les propriétés fonctionnelles des produits végétaux sans gluten.

4. Paramètres nutritionnels

Le tableau 7 présente l'effet de l'incorporation d'extrait de laurier sous forme libre et encapsulée (microcapsules dans des cellules intactes et dans des cellules plasmolysées) à différentes concentrations (0,02 ; 0,03 et 0,05 %) sur la composition nutritionnelle de la viande végétale sans gluten.

Tableau7. Effet de l'incorporation de l'extrait de laurier libre et encapsulé dans des cellules de levure sur la composition nutritionnelle de la viande végétale sans gluten.

Paramètre	Témoin	Extrait libre 0,02 %	Extrait libre 0,03 %	Extrait libre 0,05 %	Microcapsules intactes 0,02 %	Microcapsules intactes 0,03 %	Microcapsules intactes 0,05 %	Microcapsules plasmolysées 0,02 %	Microcapsules plasmolysées 0,03 %	Microcapsules plasmolysées 0,05 %
Protéines (g/100 g)	8,40 ± 0,00^{b}	8,52 ± 0,002^{ab}	8,66 ± 0,003^{a}	8,79 ± 0,002^{a}	8,31 ± 0,003^{b}	8,15 ± 0,002^{b}	8,02 ± 0,004^{b}	8,48 ± 0,003^{ab}	8,61 ± 0,002^{a}	8,73 ± 0,003^{a}
Lipides (g/100 g)	16,87 ± 0,017^{a}	14,80 ± 0,011^{b}	13,42 ± 0,010^{bc}	11,95 ± 0,012^{c}	13,90 ± 0,010^{b}	12,10± 0,01^{c}	10,72 ± 0,010^{c}	13,10 ± 0,012^{b}	11,42 ± 0,010^{c}	9,65 ± 0,010^{c}
Glucides (g/100 g)	55,00 ± 0,026^{c}	57,20 ± 0,015^{b}	58,80 ± 0,018^{ab}	60,10 ± 0,020^{a}	58,40 ± 0,017^{ab}	60,70 ± 0,01^{a}	62,10 ± 0,018^{a}	59,20 ± 0,019^{ab}	61,80 ± 0,021^{a}	63,30 ± 0,022^{a}
Valeur énergétique (kcal/100 g)	405,43 ± 0,26^{a}	394,10 ± 0,18^{b}	388,42 ± 0,15^{bc}	381,32 ± 0,12^{c}	390,26 ± 0,14^{b}	383,14±0,16^{c}	376,20 ± 0,11^{c}	387,84 ± 0,15^{b}	380,92 ± 0,13^{c}	374,86 ± 0,10^{c}

4.1.Teneur en protéine

La teneur en protéines des formulations de viande végétale sans gluten varie entre 8,02 et 8,79 g/100 g, indiquant que l'incorporation de l'extrait de laurier, sous forme libre ou microencapsulée, influence modérément la composition protéique du produit final. Le témoin présente une teneur de 8,40 g/100 g, tandis qu'une légère augmentation est observée avec l'accroissement de la concentration en extrait libre, atteignant une valeur maximale de 8,79 g/100 g à 0,05 %. Cette tendance suggère que l'incorporation directe de l'extrait pourrait contribuer à une augmentation de la fraction azotée totale de la matrice.

Les formulations enrichies par des microcapsules obtenues à partir de cellules de levure intactes présentent des teneurs protéiques légèrement inférieures à celle du témoin, comprises entre 8,02 et 8,31 g/100 g. À l'inverse, les formulations contenant des microcapsules issues de cellules plasmolysées montrent des valeurs proches ou supérieures au témoin, atteignant 8,73 g/100 g à la concentration de 0,05 %. Cette différence suggère que l'état structural des cellules de levure joue un rôle déterminant dans la disponibilité des constituants azotés au sein de la matrice alimentaire.

Les valeurs obtenues dans cette étude restent cohérentes avec celles rapportées dans la littérature pour des formulations végétales enrichies en extraits bioactifs, où les teneurs protéiques demeurent globalement stables, avec des variations modérées après enrichissement (Semouma, 2026). La légère augmentation observée dans les formulations contenant l'extrait libre ou encapsulé dans des cellules plasmolysées pourrait être attribuée à un apport additionnel en composés azotés issus de l'extrait de laurier ou des structures cellulaires de levure, ainsi qu'à une meilleure rétention des constituants protéiques au cours du procédé de formulation.

La performance relativement plus faible des microcapsules intactes peut s'expliquer par l'intégrité de la paroi cellulaire de *Saccharomyces cerevisiae,* qui agit comme une barrière physique limitant la diffusion des composés encapsulés vers la matrice alimentaire. En revanche, la plasmolyse entraîne une désorganisation partielle de la membrane et de la paroi cellulaire, augmentant la perméabilité des microcapsules et favorisant ainsi la libération des composés bioactifs et azotés. Ce phénomène pourrait améliorer les interactions entre ces composés et la matrice protéique de la viande végétale, conduisant à une disponibilité analytique plus élevée des protéines (Yang *et al.*, 2024).

Ces résultats montrent que l'effet de l'extrait de laurier sur la teneur en protéines dépend fortement du mode d'incorporation. Bien que les variations observées restent modérées, l'encapsulation dans des cellules plasmolysées semble favoriser une meilleure disponibilité des

constituants azotés comparativement aux cellules intactes. Ces observations soulignent l'importance du choix du système de microencapsulation dans l'optimisation des propriétés nutritionnelles des formulations végétales sans gluten enrichies en composés bioactifs.

4.2.Teneur en lipide

Une diminution de la teneur lipidique est observée avec l'augmentation de la concentration en extrait de laurier, suggérant une influence directe de l'enrichissement sur la fraction grasse de la formulation. Le témoin présente une teneur en lipides de 16,87 g/100 g, tandis que les formulations enrichies affichent des valeurs comprises entre 9,65 et 14,80 g/100 g. La réduction la plus marquée est enregistrée pour les formulations enrichies par des microcapsules issues de cellules plasmolysées à 0,05 %, avec une valeur minimale de 9,65 g/100 g.

Cette diminution de la teneur lipidique apparente est cohérente avec les observations rapportées dans la littérature pour des matrices alimentaires enrichies en extraits végétaux, où l'incorporation de composés phénoliques entraîne fréquemment une réduction de la fraction lipidique mesurable (Semouma, 2026). Cet effet peut être attribué à un phénomène de dilution, lié au remplacement d'une fraction de la matrice initiale par l'extrait ou les microcapsules, conduisant mécaniquement à une baisse relative du pourcentage de lipides. (Lorenzo-Munekata *et al*, 2016).

Par ailleurs, les polyphénols du laurier peuvent interagir avec les constituants lipidiques par des interactions hydrophobes, des liaisons hydrogène ou des phénomènes d'association intermoléculaire, favorisant la formation de complexes polyphénols–lipides. Ces interactions peuvent réduire l'accessibilité des lipides aux solvants d'extraction et, par conséquent, diminuer leur extractibilité analytique sans nécessairement refléter une réduction réelle de la quantité totale de lipides présents dans la matrice (Karonen, 2022).

L'effet plus prononcé observé dans les formulations contenant des microcapsules issues de cellules plasmolysées pourrait s'expliquer par une perméabilité membranaire accrue, favorisant une libération plus importante des composés phénoliques dans la matrice alimentaire. Cette disponibilité plus élevée intensifierait les interactions entre polyphénols et lipides, conduisant à une diminution plus marquée de la fraction lipidique mesurée. À l'inverse, les microcapsules obtenues à partir de cellules intactes limiteraient partiellement ces interactions grâce à une meilleure rétention des composés encapsulés. (Gmay-Cerit *et al.,* 2025).

4.3.Teneur en glucide

La teneur en glucides des formulations de viande végétale sans gluten augmente progressivement avec l'incorporation de l'extrait de laurier, passant de 55,00 g/100 g pour le témoin à 63,30 g/100 g pour les formulations enrichies par des microcapsules issues de cellules plasmolysées à 0,05 %. Cette évolution met en évidence l'impact direct de l'enrichissement sur la fraction glucidique totale de la matrice alimentaire.

Les valeurs obtenues dans cette étude sont en accord avec celles rapportées dans la littérature pour des formulations enrichies en extraits végétaux, où la teneur en glucides augmente généralement après incorporation des agents bioactifs, passant d'environ 55 g/100 g dans les matrices témoins à des valeurs supérieures à 63 g/100 g après enrichissement (Semouma, 2026). Cette augmentation reflète principalement la contribution des composés carbonés apportés par l'extrait végétal ainsi que par les matériaux d'encapsulation.

L'augmentation de la fraction glucidique peut être attribuée à plusieurs facteurs. D'une part, l'extrait de laurier apporte des polysaccharides, des oligosaccharides et des fibres solubles qui participent directement à la teneur totale en glucides. D'autre part, les systèmes de microencapsulation à base de levures contribuent également à cette augmentation, en raison de la richesse de la paroi cellulaire en β-glucanes, mannanes et autres polysaccharides structuraux. Ces composants possèdent un rôle technologique important en renforçant la structure de la matrice et en modifiant sa composition nutritionnelle finale. (Pea-Ortiz-Serrano *et al* ., 2023 ; Tolve-Bianchi *et al.*, 2022).

L'effet plus prononcé observé avec les microcapsules issues de cellules plasmolysées pourrait s'expliquer par une altération de la structure cellulaire induite par la plasmolyse, favorisant une libération plus importante des constituants glucidiques vers la matrice alimentaire. Cette plus grande disponibilité des polysaccharides structuraux pourrait contribuer à l'augmentation plus marquée de la teneur glucidique mesurée analytiquement. (Gmay-Cerit *et al.,* 2025 ; Karaman *et al.,* 2021).

Dans l'ensemble, ces résultats confirment que l'enrichissement en extrait de laurier, particulièrement sous forme microencapsulée, modifie significativement la composition glucidique des formulations. Cette augmentation souligne le rôle structurant des polysaccharides issus à la fois de l'extrait végétal et des matériaux d'encapsulation dans la détermination des propriétés nutritionnelles et technologiques du produit final (Cegledi *et al.,*

2022).

4.4.Valeur énergétique

La valeur énergétique des formulations de viande végétale sans gluten diminue progressivement avec l'augmentation de la concentration en extrait de laurier, passant de 405,43 kcal/100 g pour le témoin à 374,86 kcal/100 g pour les formulations enrichies par des microcapsules issues de cellules plasmolysées à 0,05 %. Cette tendance indique que l'enrichissement, en particulier sous forme microencapsulée, influence significativement la densité énergétique du produit final. Les résultats obtenus sont cohérents avec ceux rapportés dans la littérature, où une diminution de la valeur énergétique d'environ 7 % après enrichissement a également été observée (Semouma, 2026). Cette réduction est principalement attribuée à la baisse de la teneur en lipides, lesquels constituent la fraction nutritionnelle la plus énergétique, avec une contribution de 9 kcal/g, contre 4 kcal/g pour les protéines et les glucides. Ainsi, même une diminution modérée de la fraction lipidique peut entraîner une réduction notable de l'apport calorique global.

Bien que l'incorporation de l'extrait de laurier ait entraîné une augmentation de la teneur en glucides, celle-ci n'a pas compensé la diminution énergétique liée à la réduction des lipides. Cette observation confirme que la variation de la valeur calorique est principalement gouvernée par les modifications de la fraction lipidique plutôt que par l'évolution des autres macronutriments. Des observations similaires ont été rapportées par Assaye *et al.* (2021), qui ont montré que la réduction des lipides constitue le principal levier de diminution de la densité énergétique dans les formulations alimentaires enrichies.L'effet plus marqué observé avec les microcapsules issues de cellules plasmolysées pourrait être lié à une plus grande libération des composés phénoliques dans la matrice alimentaire, favorisant davantage les interactions polyphénols–lipides et réduisant ainsi la fraction lipidique extractible. Ce comportement contribue indirectement à la diminution de la valeur énergétique apparente du produit.

Ces résultats confirment que la microencapsulation, et plus particulièrement l'encapsulation dans des cellules plasmolysées, constitue une stratégie prometteuse pour la valorisation des extraits de laurier dans des matrices végétales. Au-delà de l'incorporation de composés bioactifs, cette approche permet également d'améliorer le profil nutritionnel global en réduisant la densité énergétique du produit, ce qui représente un avantage important dans le développement d'aliments fonctionnels innovants à haute valeur ajoutée nutritionnelle et technologique (Dobroslavić *et al.*, 2023).

5. Paramètres physicochimiques

Les paramètres physicochimiques des différentes formulations des viandes végétales sont montrés dans le **tableau 8.**

Tableau 8. Caractéristiques physicochimiques (activité de l'eau, pH, extrait sec soluble, humidité et cendres) des formulations de viande végétale sans gluten enrichies en extrait de laurier libre et encapsulé à différentes concentrations.

Paramètre	Témoin	Extrait libre 0,02%	Extrait libre 0,03%	Extrait libre 0,05%	Cellules intactes 0,02%	Cellules intactes 0,03%	Cellules intactes 0,05%	Cellules plasmolysées 0,02%	Cellules plasmolysées 0,03%	Cellules plasmolysées 0,05%
Activité de l'eau	0,754 ± 0,002^{a}	0,749 ± 0,001^{ab}	0,746 ± 0,001^{b}	0,742 ± 0,001^{c}	0,747 ± 0,001^{b}	0,743 ± 0,001^{c}	0,739 ± 0,001^{d}	0,746 ± 0,001^{b}	0,741 ± 0,001^{c}	0,736 ± 0,001^{e}
pH	6,17 ± 0,18^{a}	6,21 ± 0,01^{a}	6,24 ± 0,01^{a}	6,28 ± 0,01^{ab}	6,26 ± 0,01^{a}	6,30 ± 0,01^{ab}	6,34 ± 0,01^{b}	6,25 ± 0,01^{a}	6,30 ± 0,01^{ab}	6,36 ± 0,01^{b}
Extrait sec soluble (°Brix)	3,37 ± 0,06^{d}	3,56 ± 0,02^{c}	3,75 ± 0,01^{b}	3,93 ± 0,01^{a}	3,69 ± 0,01^{bc}	3,85 ± 0,01^{ab}	4,03 ± 0,01^{a}	3,61 ± 0,01^{c}	3,79 ± 0,01^{b}	3,96 ± 0,01^{a}
Teneur en humidité (%)	19,30 ± 0,03^{a}	19,46 ± 0,01^{a}	19,59 ± 0,02^{a}	19,71 ± 0,01^{a}	19,11 ± 0,01^{a}	18,96 ± 0,01^{a}	18,81 ± 0,01^{a}	19,01 ± 0,01^{a}	18,88 ± 0,01^{a}	18,71 ± 0,01^{a}
Cendres (% MS)	2,58 ± 0,11^{c}	2,65 ± 0,01^{bc}	2,71 ± 0,01^{b}	2,80 ± 0,01^{a}	2,63 ± 0,01^{bc}	2,71 ± 0,01^{b}	2,81 ± 0,01^{a}	2,68 ± 0,01^{b}	2,76 ± 0,01^{ab}	2,87 ± 0,01^{a}

5.1.Activité de l'eau (aw)

L'activité de l'eau (aw) des formulations de viande végétale sans gluten varie dans un intervalle étroit compris entre 0,736 et 0,754, indiquant que l'incorporation de l'extrait de laurier, sous forme libre ou microencapsulée, n'altère que modérément l'équilibre hydrique de la matrice alimentaire. Le témoin présente la valeur la plus élevée (0,754), tandis qu'une légère diminution est observée après enrichissement, la valeur minimale étant enregistrée pour les formulations contenant des microcapsules issues de cellules plasmolysées à 0,05 % (0,736).

Cette diminution de l'activité de l'eau suggère une réduction de la fraction d'eau libre disponible dans la matrice, probablement liée à la capacité des composés phénoliques du laurier ainsi que des matériaux d'encapsulation à interagir avec les molécules d'eau via des liaisons hydrogène. Ces interactions favorisent l'immobilisation partielle de l'eau, réduisant ainsi sa disponibilité pour les réactions biochimiques et la croissance microbienne. En particulier, les polysaccharides structuraux des cellules de levure, tels que les β-glucanes et les mannoprotéines, possèdent un fort pouvoir de rétention hydrique susceptible de modifier la distribution de l'eau au sein du réseau alimentaire. (Mikus-Galus *et al,* 2025).

Les valeurs obtenues sont en accord avec celles rapportées dans la littérature pour des produits végétaux enrichis en extraits bioactifs, où des valeurs d'aw comprises entre 0,743 et 0,754 ont été observées (Semouma, 2026). La similitude entre les valeurs du témoin dans les deux études (0,754) confirme la bonne reproductibilité des caractéristiques hydriques de la matrice de base. Bien que les différences observées après enrichissement restent faibles, la diminution est légèrement plus marquée dans la présente étude, notamment pour les formulations contenant des microcapsules issues de cellules plasmolysées, suggérant un effet plus prononcé de ce système encapsulant sur la rétention de l'eau.

L'effet plus important observé avec les cellules plasmolysées peut être attribué à l'altération de la structure membranaire induite par la plasmolyse, qui augmente l'exposition des groupements hydrophiles capables de fixer l'eau. Cette réorganisation structurale favorise probablement une interaction plus intense entre les constituants des microcapsules et la phase aqueuse, entraînant une diminution plus nette de l'activité de l'eau. Des observations similaires ont été rapportées par Peña-Ortiz *et al.* (2023), qui ont montré que l'enrichissement en extraits phénoliques peut réduire l'aw des matrices végétales en augmentant la capacité de liaison à l'eau. Des résultats comparables ont également été observés par Dobroslavić *et al.* (2023) dans des analogues végétaux enrichis en microcapsules issues de cellules plasmolysées.

5.2. pH

Le pH des formulations de viande végétale sans gluten augmente progressivement avec l'incorporation de l'extrait de laurier, passant de 6,17 pour le témoin à 6,36 pour les formulations enrichies par des microcapsules issues de cellules plasmolysées à 0,05 %. Cette évolution met en évidence une influence du mode d'enrichissement sur l'équilibre acido-basique de la matrice alimentaire. Une différence significative a été observée entre certaines formulations ($p < 0,05$), indiquant que l'effet de l'enrichissement sur le pH n'est pas uniquement lié à la concentration, mais également à la forme d'incorporation de l'extrait.

L'augmentation du pH peut être attribuée à la présence de composés minéraux à caractère alcalinisant, notamment le potassium, le calcium et le magnésium, naturellement présents dans le laurier et susceptibles d'être libérés dans la matrice alimentaire lors de l'enrichissement. Par ailleurs, certains métabolites secondaires de l'extrait pourraient également contribuer à modifier l'équilibre ionique du système, entraînant une légère augmentation du pH. (Tawfek & Ali, 2022).

Les résultats obtenus sont globalement cohérents avec ceux rapportés dans la littérature, où le pH varie de 6,17 pour le témoin à 6,30 pour les formulations contenant des microcapsules issues de cellules intactes et 6,29 pour celles contenant des cellules plasmolysées (Semouma, 2026). La valeur du témoin est identique dans les deux études, confirmant la stabilité de la matrice de base. Toutefois, l'augmentation du pH est plus marquée dans la présente étude, particulièrement pour les formulations enrichies par des microcapsules issues de cellules plasmolysées. Cette différence pourrait s'expliquer par la composition spécifique de l'extrait de laurier ainsi que par une libération plus importante des composés encapsulés due à l'altération structurale des cellules après plasmolyse. (Karaman *et al,* 2021).

L'effet plus prononcé observé avec les cellules plasmolysées suggère que la désorganisation partielle de la membrane cellulaire améliore la diffusion des composés encapsulés vers la matrice alimentaire. En revanche, les microcapsules issues de cellules intactes assurent une rétention plus importante des composés bioactifs, limitant ainsi leur impact immédiat sur le pH. Ce comportement confirme que le type de microencapsulation influence non seulement la protection des composés bioactifs, mais également leur cinétique de libération. (Devahastin & Yun, 2021).

D'un point de vue technologique, les variations observées restent modérées et maintiennent le pH dans une plage compatible avec les analogues végétaux de viande. Cette plage de pH

est favorable au maintien de la stabilité des protéines végétales, en limitant leur dénaturation excessive et en améliorant leur capacité de rétention d'eau. Une légère augmentation du pH peut également favoriser la solubilité protéique et renforcer certaines propriétés texturales du produit final. Des observations similaires ont été rapportées par Benli & Şahin (2024), qui ont montré que des variations modérées du pH dans des matrices végétales enrichies n'altèrent pas la stabilité techno-fonctionnelle du système.

5.3.Extrait sec soluble (°Brix)

L'extrait sec soluble, exprimé en °Brix, augmente significativement avec l'incorporation de l'extrait de laurier ($p < 0,05$), indiquant une élévation de la fraction totale des composés solubles au sein des formulations de viande végétale sans gluten. Les valeurs passent de 3,37 °Brix pour le témoin à 4,03 °Brix pour les formulations enrichies par des microcapsules issues de cellules de levure intactes à 0,05 %, tandis que les formulations contenant des microcapsules issues de cellules plasmolysées atteignent 3,96 °Brix à la même concentration. Cette augmentation reflète principalement l'apport de composés hydrosolubles provenant de l'extrait de laurier, notamment les polyphénols, flavonoïdes, sucres solubles, acides organiques et autres métabolites secondaires. L'augmentation progressive du °Brix avec la concentration d'extrait incorporée indique qu'une quantité croissante de matière dissoute est intégrée dans la matrice alimentaire, modifiant ainsi sa composition physicochimique. (Bruno Foundikou *et al*, 2025).

Les résultats obtenus sont cohérents avec ceux rapportés dans la littérature, où une augmentation significative du °Brix a également été observée après enrichissement en extraits végétaux, avec des valeurs supérieures à celles du témoin pour les extraits libres et microencapsulés (Semouma, 2026).

La valeur élevée observée avec les microcapsules obtenues à partir de cellules intactes suggère une meilleure rétention des composés solubles au sein du système encapsulant, permettant leur incorporation efficace dans la matrice tout en limitant leur dégradation pendant le procédé de formulation. L'intégrité de la paroi cellulaire de *Saccharomyces cerevisiae* favorise vraisemblablement la protection des molécules hydrosolubles contre l'oxydation ou les pertes technologiques, ce qui se traduit par une augmentation plus prononcée du °Brix mesuré. (Hatip & Karaman,2024).Les formulations contenant des microcapsules issues de cellules plasmolysées présentent également une augmentation importante du °Brix. La valeur relativement élevée observée dans ce cas suggère que la plasmolyse favorise la libération des composés solubles vers la matrice alimentaire en augmentant la perméabilité cellulaire. Ce comportement indique que l'effet de la plasmolyse dépend fortement de la nature de l'extrait

encapsulé ainsi que des interactions établies avec la matrice végétale. Des observations similaires ont été rapportées par Dobroslavić-Repajić *et al.* (2022) et Dobroslavić-Zorić *et al.* (2024), qui ont montré que la microencapsulation peut modifier significativement la disponibilité des composés solubles dans des matrices végétales enrichies.

5.4.Humidité

L'humidité des formulations de viande végétale sans gluten varie dans un intervalle relativement étroit, compris entre 18,71 et 19,71 %, indiquant que l'incorporation de l'extrait de laurier, sous forme libre ou microencapsulée, influence faiblement la teneur globale en eau du produit. Les formulations contenant l'extrait libre présentent les valeurs les plus élevées, atteignant 19,71 % à la concentration de 0,05 %, tandis qu'une légère diminution est observée dans les formulations enrichies par des microcapsules, qu'elles soient issues de cellules intactes ou plasmolysées.

Les résultats obtenus sont cohérents avec ceux rapportés dans la littérature, où des valeurs d'humidité comprises entre 18,90 et 19,60 % ont été observées après enrichissement de matrices végétales en extraits bioactifs (Semouma, 2026). Dans les deux études, l'extrait libre tend à augmenter légèrement l'humidité, alors que les formulations microencapsulées présentent des valeurs légèrement inférieures. Cette tendance suggère que le mode d'incorporation de l'extrait influence davantage la distribution de l'eau dans la matrice que la quantité totale d'eau présente.

La légère diminution observée dans les systèmes microencapsulés peut être attribuée à l'augmentation de la matière sèche apportée par les microcapsules, ce qui modifie le rapport eau/matière sèche du produit final. Par ailleurs, les matériaux d'encapsulation, en particulier les constituants de la paroi cellulaire de *Saccharomyces cerevisiae* tels que les β-glucanes et les mannoprotéines, possèdent une capacité importante de liaison à l'eau. Ces interactions favorisent la rétention de l'eau sous forme liée, réduisant la fraction d'eau libre sans entraîner de perte significative de l'humidité totale. Bien que l'humidité globale reste pratiquement stable, la microencapsulation peut modifier la microdistribution de l'eau en favorisant son immobilisation au sein du réseau structural. Cette réorganisation hydrique contribue à limiter la mobilité moléculaire, améliorant ainsi la stabilité physicochimique des formulations enrichies. (Makriyanni & Yanni, 2026).

Le maintien d'un équilibre hydrique stable est essentiel pour préserver la jutosité, la sensation en bouche et les propriétés structurales des analogues végétaux de viande. Des observations

similaires ont été rapportées par Guyony *et al.* (2022) et Dobroslavić *et al.* (2023), qui ont montré que les systèmes microencapsulés contribuent à stabiliser l'état hydrique des matrices végétales enrichies tout en maintenant leurs propriétés techno-fonctionnelles.

5.5.**Teneur en cendres**

La teneur en cendres des formulations de viande végétale sans gluten augmente progressivement avec l'incorporation de l'extrait de laurier, indiquant un enrichissement graduel de la fraction minérale du produit. Le témoin présente une teneur en cendres de 2,58 %, tandis que les valeurs maximales atteignent 2,80 % pour l'extrait libre, 2,81 % pour les formulations enrichies par des microcapsules issues de cellules intactes et 2,87 % pour celles contenant des microcapsules issues de cellules plasmolysées à la concentration de 0,05 %. Une différence significative a été observée entre certaines formulations ($p < 0,05$), confirmant l'effet combiné de la concentration en extrait et du mode d'encapsulation sur la composition minérale finale. Cette augmentation de la teneur en cendres reflète principalement l'apport en éléments minéraux naturellement présents dans les feuilles de laurier, notamment le potassium, le calcium, le magnésium et le phosphore. Ces composés inorganiques contribuent directement à l'augmentation du résidu minéral après incinération, traduisant ainsi une amélioration du profil minéral des formulations enrichies. Les résultats obtenus sont cohérents avec ceux rapportés dans la littérature, où une augmentation de la teneur en cendres après enrichissement en extraits végétaux a également été observée, avec des valeurs comprises entre 2,58 et 2,72 % (Semouma, 2026).

L'effet le plus prononcé est observé dans les formulations contenant des microcapsules issues de cellules plasmolysées. Cette tendance suggère que la plasmolyse améliore la disponibilité des composés minéraux encapsulés en raison de la désorganisation partielle de la membrane et de la paroi cellulaire. Cette modification structurale augmente la perméabilité cellulaire et favorise la diffusion des constituants intracellulaires vers la matrice environnante, conduisant à une augmentation plus importante de la fraction minérale mesurée analytiquement. À l'inverse, les microcapsules issues de cellules intactes assurent une rétention plus importante des composés encapsulés, limitant partiellement leur libération immédiate. (Dadkhodazade *et al*, 2018).Des observations similaires ont été rapportées par Peña-Ortiz *et al.* (2023), qui ont montré que l'incorporation d'extraits végétaux riches en minéraux augmente significativement la teneur en cendres des matrices alimentaires enrichies. Des tendances comparables ont également été décrites par Dobroslavić *et al.* (2023), confirmant que l'état structural des systèmes encapsulants influence directement la biodisponibilité des composés

minéraux.

6. Les attributs sensoriels

L'aspect visuel des différentes formulations de viande végétale sans gluten est présenté dans **la Figure 15.**

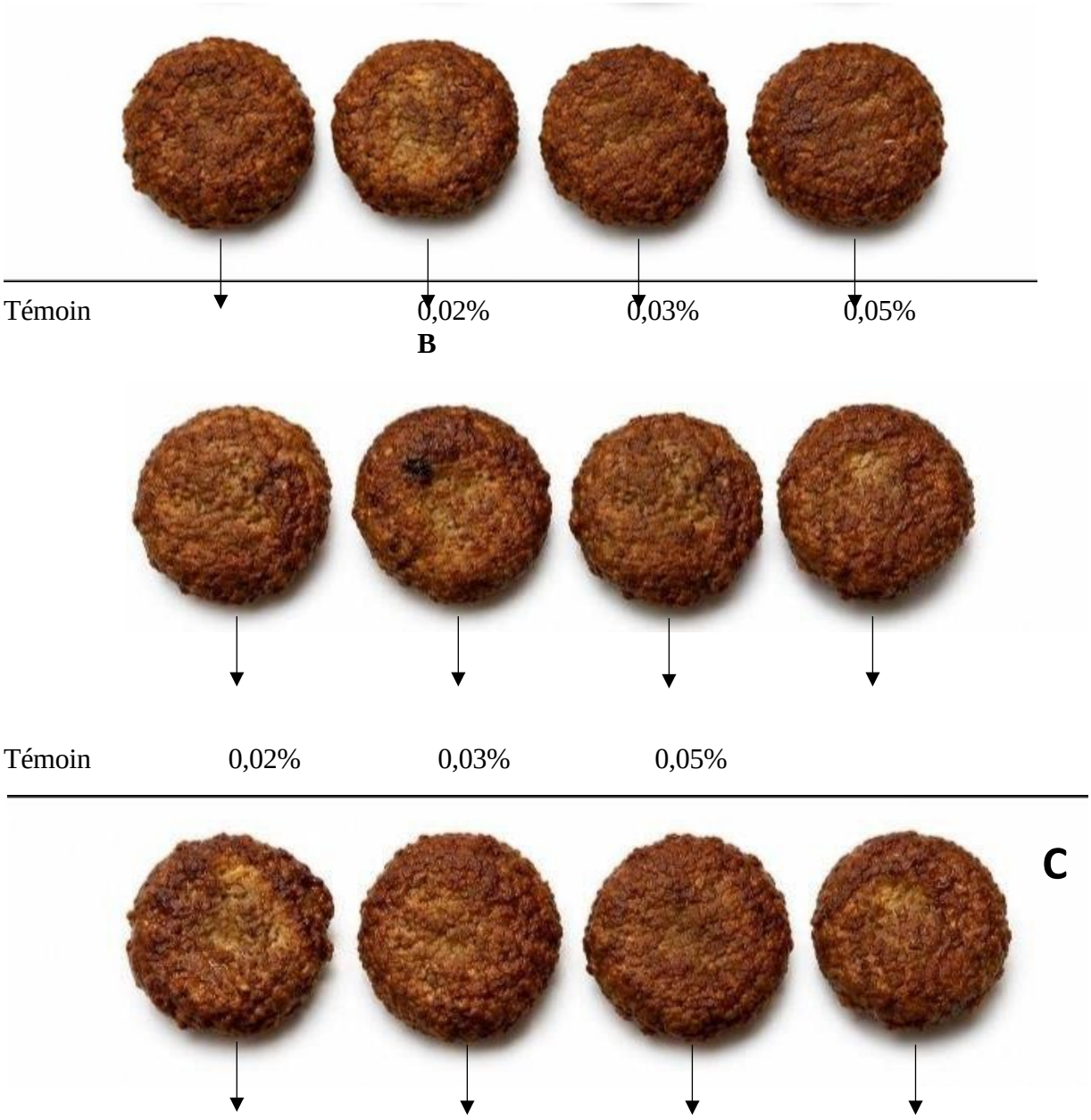


Figure 15. Aspect visuel des formulations de viande végétale sans gluten enrichies en extrait de laurier sous différentes formes et concentrations (témoin, 0,02 %, 0,03 % et 0,05 %) : (A) extrait libre ; (B) extrait microencapsulé dans des cellules de levure intactes ; (C) extrait microencapsulé dans des cellules de levure plasmolysées.

L'analyse sensorielle des différentes formulations de viande végétale sans gluten, enrichies en extrait sous forme libre, encapsulé dans des cellules intactes ou plasmolysées, a été réalisée auprès d'un panel de 30 dégustateurs. Les résultats relatifs aux différents attributs sensoriels sont présentés dans **la figure 16.**

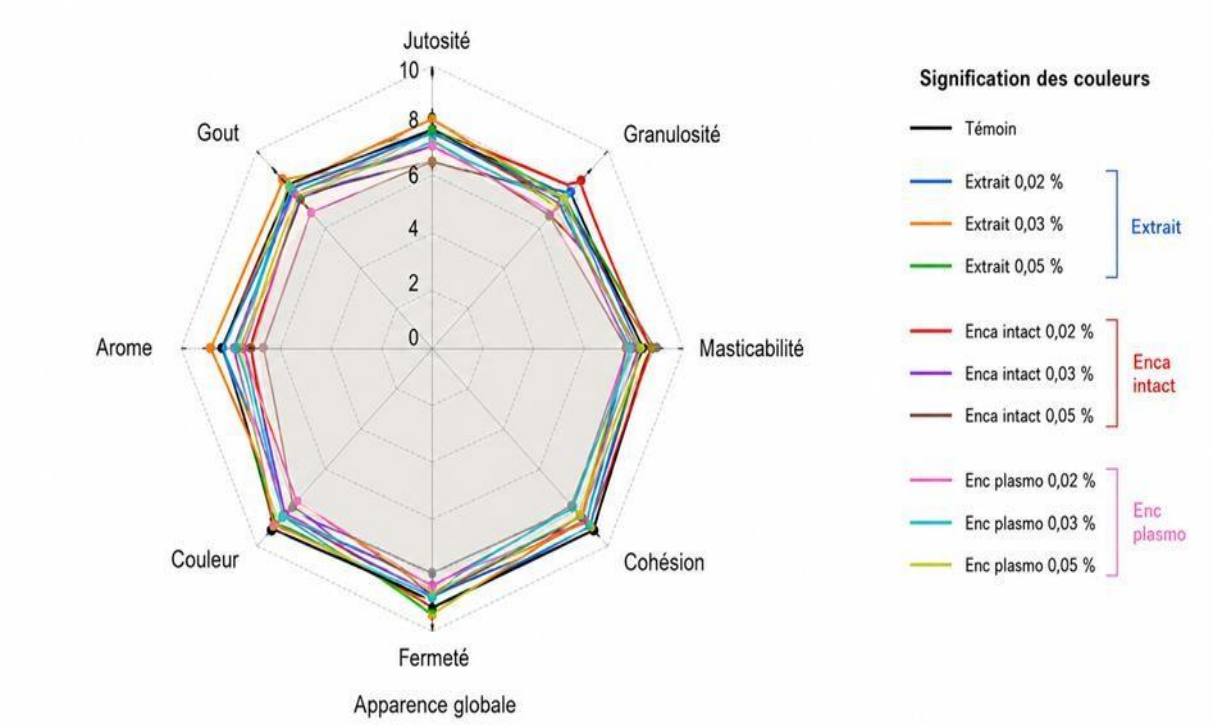


Figure 16. Profil sensoriel des différentes formulations de viande végétale sans gluten enrichies en extrait de laurier sous forme libre et encapsulée dans des cellules de levure intactes et plasmolysées**.**

Les résultats de l'analyse sensorielle montrent que l'incorporation de l'extrait de laurier, sous forme libre ou encapsulée, a permis de maintenir une acceptabilité sensorielle élevée de la viande végétale sans gluten, l'ensemble des attributs évalués présentant des scores supérieurs à 5,8/9 et généralement compris entre 6,5 et 8,3. Cette tendance indique que l'enrichissement n'a pas altéré les propriétés organoleptiques du produit et, dans plusieurs cas, a même contribué à améliorer certaines caractéristiques sensorielles.

Concernant les attributs d'apparence, les scores d'apparence globale demeurent élevés pour toutes les formulations (7,13–8,07). L'incorporation de l'extrait libre induit une augmentation progressive de l'appréciation visuelle avec la concentration, la formulation contenant 0,05 % d'extrait libre présentant le score le plus élevé (8,07). Cette amélioration suggère que les

composés du laurier contribuent à renforcer l'homogénéité visuelle de la matrice et à améliorer l'aspect de surface du produit.

Les formulations encapsulées ont également obtenu des notes élevées, bien que légèrement inférieures à celles de l'extrait libre. Cette légère diminution pourrait être attribuée à la présence des microcapsules dispersées dans la matrice, susceptibles de modifier subtilement la réflexion de la lumière ou l'uniformité de la surface. Toutefois, les différences observées restent faibles, confirmant que l'encapsulation permet l'incorporation de l'extrait sans compromettre l'attrait visuel du produit, conformément aux observations rapportées pour d'autres systèmes alimentaires enrichis en composés bioactifs encapsulés (Calderón-Oliver *et al.,* 2022).

L'évaluation de la couleur révèle également une excellente acceptabilité, avec des scores compris entre 7,40 et 8,33. La formulation contenant 0,03 % d'extrait libre présente la valeur la plus élevée (8,33), suggérant que cette concentration permet d'obtenir un équilibre optimal entre l'apport des pigments naturels du laurier et les caractéristiques intrinsèques de la matrice végétale. Les formulations encapsulées présentent des scores comparables (7,80–8,07), ce qui indique que l'encapsulation préserve efficacement la stabilité chromatique tout en limitant les interactions directes entre les pigments et les constituants de la matrice. Cette stabilité constitue un avantage technologique important pour les produits végétaux fonctionnels destinés à une conservation prolongée (Benli *et al.,* 2024).

L'arôme constitue l'un des attributs les plus influencés par l'encapsulation. Alors que les formulations contenant l'extrait libre présentent des scores relativement stables autour de 7,0–7,3, les systèmes encapsulés, notamment les cellules plasmolysées et intactes à 0,03 %, atteignent les valeurs les plus élevées (7,80). Cette amélioration suggère que l'encapsulation protège efficacement les composés volatils du laurier contre les pertes durant la préparation et favorise leur libération progressive lors de la dégustation. Les cellules plasmolysées semblent particulièrement efficaces grâce à leur structure plus poreuse, susceptible d'améliorer la rétention puis la diffusion contrôlée des molécules aromatiques, phénomène déjà rapporté dans plusieurs travaux consacrés aux systèmes de microencapsulation à base de levures (Saifullah *et al.,* 2019 ; Dobroslavić *et al.,* 2023).

L'analyse des propriétés texturales met en évidence une bonne préservation des caractéristiques mécaniques du produit. La jutosité est améliorée par rapport au témoin (6,20) dans la majorité des formulations enrichies, avec des scores atteignant 7,53 pour l'extrait libre à 0,02 % et 7,40 pour les cellules plasmolysées à 0,02 %. Cette amélioration peut être liée à la

capacité des composés végétaux et des matériaux d'encapsulation à favoriser la rétention d'eau au sein de la matrice, limitant ainsi les pertes d'humidité pendant la cuisson et la mastication (Godschalk-Broers 2022 ; Zhang, 2025).

La fermeté présente des variations modérées entre les formulations. Le témoin affiche l'une des valeurs les plus élevées (7,13), tandis que certaines formulations encapsulées, notamment les cellules intactes à 0,02 %, montrent une diminution du score (5,80). Cette réduction peut résulter de l'incorporation de particules encapsulées qui perturbent localement la continuité du réseau structural.

Cependant, lorsque la concentration augmente à 0,03 % et 0,05 %, les valeurs redeviennent proches de celles du témoin, suggérant une meilleure intégration des systèmes encapsulés dans la matrice. La cohésion et la masticabilité demeurent globalement satisfaisantes. Les formulations contenant des cellules plasmolysées à 0,02 % et 0,05 % présentent les scores de cohésion les plus élevés (7,0), indiquant une meilleure intégrité structurale lors de la mastication. À l'inverse, les formulations encapsulées à 0,02 % présentent les valeurs de masticabilité les plus faibles (5,93), ce qui pourrait traduire une légère diminution de la résistance mécanique de la matrice. Néanmoins, l'ensemble des scores reste supérieur à 5,9, démontrant que les modifications apportées n'affectent pas négativement la perception texturale globale.

La granulosité constitue l'attribut présentant les variations les plus marquées. Les scores les plus élevés sont observés pour les cellules intactes à 0,03 % (7,53) et l'extrait libre à 0,05 % (7,27). Cette augmentation peut être associée à la présence de particules végétales ou de microcapsules perceptibles en bouche. Toutefois, les valeurs obtenues demeurent dans une plage d'acceptabilité élevée, indiquant que cette perception n'a pas été considérée comme un défaut par les dégustateurs.

Du point de vue gustatif, l'ensemble des formulations présente une excellente acceptabilité. Les scores de goût varient entre 7,40 et 8,07, les meilleures appréciations étant obtenues pour l'extrait libre à 0,02 % et les cellules plasmolysées à 0,02 % (8,07). Ces résultats suggèrent que l'ajout de l'extrait de laurier enrichit le profil aromatique de la viande végétale sans générer de saveurs indésirables. Les formulations encapsulées maintiennent également des scores élevés (7,40–7,93), confirmant que l'encapsulation permet de préserver les composés responsables de la saveur tout en modulant leur libération. Les cellules plasmolysées semblent particulièrement performantes, probablement en raison de leur capacité d'encapsulation supérieure et de leur cinétique de libération plus adaptée aux conditions de dégustation (Premjit

et al., 2021 ; Shokri-Tometri *et al.*, 2020).

Ces résultats démontrent que l'incorporation de l'extrait de laurier améliore ou maintient les principales caractéristiques sensorielles de la viande végétale sans gluten. L'extrait libre apparaît particulièrement favorable pour l'amélioration de l'apparence et de la couleur, tandis que les systèmes encapsulés, notamment ceux basés sur les cellules plasmolysées, optimisent davantage les attributs aromatiques et gustatifs. Ces observations confirment l'intérêt de la microencapsulation comme stratégie technologique permettant d'associer fonctionnalité, stabilité des composés bioactifs et acceptabilité sensorielle élevée dans les produits végétaux innovants.

Conclusion

Ce travail s'inscrit dans une démarche de valorisation des ressources végétales méditerranéennes et de développement d'ingrédients fonctionnels destinés à la formulation d'aliments innovants, durables et à valeur nutritionnelle accrue. L'objectif principal était d'exploiter le potentiel bioactif des composés phénoliques de *Laurus nobilis* L. et de développer une stratégie de microencapsulation utilisant des cellules de levure *Saccharomyces cerevisiae* afin d'améliorer leur stabilité et leur incorporation dans un analogue de viande végétale sans gluten.

Les résultats ont démontré l'efficacité de la microencapsulation pour protéger les composés phénoliques du laurier. Les microcapsules obtenues à partir de cellules intactes ou plasmolysées ont présenté des teneurs significativement plus élevées en polyphénols et en flavonoïdes que l'extrait libre. Les cellules intactes ont favorisé la rétention des polyphénols totaux, tandis que les cellules plasmolysées ont permis une meilleure conservation des flavonoïdes, confirmant le rôle protecteur de la paroi levurienne et l'intérêt de la plasmolyse dans le stockage intracellulaire des molécules bioactives.

Cette protection s'est traduite par une amélioration marquée de l'activité antioxydante, les extraits encapsulés présentant des taux d'inhibition du radical DPPH supérieurs à 89 %, contre 69,7 % pour l'extrait libre. Après incorporation dans les formulations végétales, les formes encapsulées ont également permis de maintenir des activités antioxydantes élevées.

L'enrichissement d'une matrice végétale à base de haricot blanc, lentilles et avoine a conduit à l'obtention d'un analogue de viande présentant des caractéristiques nutritionnelles, fonctionnelles et technologiques intéressantes. Les formulations enrichies ont montré une augmentation des teneurs en protéines et en composés bioactifs tout en conservant des paramètres physicochimiques compatibles avec la stabilité et la qualité du produit.

Les analyses des polyphénols, flavonoïdes et tanins ont confirmé l'intérêt de l'encapsulation pour améliorer la rétention des composés phénoliques dans la matrice alimentaire. Les formulations contenant les extraits encapsulés, notamment dans les cellules intactes, ont présenté les concentrations les plus élevées en molécules bioactives.

L'évaluation sensorielle a révélé une bonne acceptabilité globale de l'ensemble des formulations. Les extraits encapsulés, particulièrement dans les cellules plasmolysées, ont amélioré les caractéristiques aromatiques et gustatives sans altérer la texture des produits, démontrant la compatibilité de cette technologie avec la production d'analogues carnés végétaux.

Dans l'ensemble, cette étude met en évidence le potentiel de *Laurus nobilis* comme source

naturelle de composés bioactifs et confirme l'efficacité des cellules de levure comme systèmes naturels de protection et de vectorisation des polyphénols. La microencapsulation a permis de développer un analogue de viande végétale sans gluten présentant des propriétés nutritionnelles, fonctionnelles et sensorielles améliorées.

Parmi les perspectives envisagées figurent l'évaluation de la bioaccessibilité et de la biodisponibilité des composés encapsulés, l'étude de leur stabilité au cours du stockage, l'optimisation des paramètres d'encapsulation ainsi que l'application de cette approche à d'autres extraits végétaux et matrices alimentaires. Des études biologiques et technico-économiques complémentaires permettront également de confirmer le potentiel industriel de cette stratégie pour le développement de nouveaux aliments fonctionnels.

Références bibliographiques

Abu-Dahab, R., Kasabri, V., & Afifi, F.U. (2014). Evaluation of the volatile oil composition and antiproliferative activity of Laurus nobilis L. (Lauraceae) on breast cancer cell line models. Records of Natural Products, 8(2), 136-147.

Ahmad, M.A., Lim, Y.H., Chan, Y.S., Hsu, C.-Y., Wu, T.-Y., & Sit, N.W. (2022). Chemical composition, antioxidant, antimicrobial and antiviral activities of the leaf extracts of Syzygium myrtifolium. Acta Pharmaceutica, 72(2), 600-650.

Al Chalabi, S., Majeed, D., Jasim, A., & Al-Azzawi, K. (2020). Benefit effect of ethanolic extract of Bay leaves (Laura nobilis) on blood sugar level in adult diabetic rats induced by alloxan monohydrate. Annalsof Tropical Medicine and Public Health, 23(16), SP231608.

Al-Hashimi, A. G., & Mahmood, S. A. (2016). The nutritional value and antioxidant activity of bay leaves (Laurus nobilis L.).

AL-Samarrai, O.R., Naji, N.A., & Hameed, R.R. (2017). Effect of Bay leaf (Laurus nobilis L.) and its isolated (flavonoids and glycosides) on the lipids profile in the local Iraqi female rabbits. Tikrit Journal of Pure Science, 22(6), 72-75.

Alejo-Armijo, A., Altarejos, J., & Salido, S. (2017). Phytochemicals and biological activities of laurel tree (Laurus nobilis). Natural Product Communications, 12(5), 743-757. Aljamal, A. (2010). Effects of bay leaves on blood glucose and lipid profiles on the patients with type 1 diabetes. World Academy of Science, Engineering and Technology, 69, 211-214.

Alemu, T. (2023). Profil de texture et conception des produits alimentaires. Journal of Agriculture and Horticulture Research.

Ambrose, D.C., Manickavasagan, A., & Naik, R. (2016). Leafy medicinal herbs: botany, chemistry, postharvest technology and uses. CABI.

Andreani, G., Sogari, G., Marti, A., Froldi, F., Dagevos, H., & Martini, D. (2023). Plant-Based Meat Alternatives: Technological, Nutritional, Environmental, Market, and Social Challenges and Opportunities. Nutrients, 15.

Anwar, S., Syed, Q. A., Asmat, U., Arshad, M., Rehman, M. A., Ahmad, W., & Muzammil, H. S. (2023). Antioxidants quantification, minerals profile, color properties and sensorial quality of Laurus nobilis composite tea infused with ginger and stevia. Journal of Food Measurement and Characterization, 17(5), 5144-5153.

Arora, B., Kamal, S., & Sharma, V. P. (2017). Effect of binding agents on quality characteristics of mushroom based sausage analogue. Journal of Food Processing and Preservation, 41. 10.1111/jfpp.13134. Onwezen, M. C., & Van der Weele, C. N. (2016). When indifference is ambivalence: Strategic ignorance about meat consumption. Food Quality and Preference, 52, 96–105.

Assaye, M., Tamirat, B., & Fekadu, B. (2021). Ethanol concentration and calorific value of some local distilled Ethiopian alcohol (Areki): an energy potential assessment. Cogent Engineering, 8(1), 1979444.

Ayivi, R., Ibrahim, S., Colleran, H., Silva, R., Williams, L., Galanakis, C., et al., (2021). COVID-19: Human immune response and the influence of food ingredients and active compounds. Bioactive Compounds in Health and Disease, 4(6), 100. 10.31989/bchd.v4i6.802.

Ayoub, N.A., Hashim, A.N., Hussein, S.A., Hegazi, N.M., Hassanein, H.M., & Nawwar, M.A. (2013). Hepatoprotective effect of bay leaves crude extract on primary cultured rat hepatocytes. European Scientific Journal, 9(21).

Azeem, M. S., Mahmood, N., Khan, S. A., Mehmood, M. A., Amir, A., & Butt, M. A. (2026). Development of Functional Meat Products Enriched with Plant-Based Bioactive Compounds. Global Research Journal of Natural Science and Technology.

Bakhsh, A., Park, J., Baritugo, K.-A., Kim, B., Moon, S. S., Rahman, A., & Park, S.-W. (2023). A holistic approach toward development of plant-based meat alternatives through incorporation of novel microalgae-based ingredients. Frontiers in Nutrition, 10.

Ballabio, R., & Goetz, P. (2010). Huile de graine/fruit de laurier Laurus nobilis L., Laurus azorica (Seub.) Franco, Laurus novocanariensis Rivas Mart., Lousã, Fern. Prieto, E. Dias, JC Costa et C. Aguiar. *Phytothérapie*, *8*(2), 141-144.

Barla, A., Topçu, G., Öksüz, S., Tümen, G., & Kingston, D.G. (2007). Identification of cytotoxic sesquiterpenes from Laurus nobilis L. Food Chemistry, 104(4), 1478-1484.

Barroso, W., Duarte Gondim, R., Marques, V., Lael, M., Santos, P., & Oliveira Castro, A. (2018). Pharmacognostic Characterization of Laurus nobilis L. Leaves. Journal of Chemical and Pharmaceutical Research, 10(1), 30-37.

Barzegar, F., Kamankesh, M., & Mohammadi, A. (2019). Heterocyclic aromatic amines in cooked food: A review on formation, health risk-toxicology and their analytical techniques. Food Chemistry, 280, 240–254. 10.1016/j.foodchem.2018.12.058.

Bendjersi, F.Z., Tazerouti, F., Belkhelfa-Slimani, R., Djerdjouri, B., & Meklati, B.Y. (2016). Phytochemical composition of the Algerian Laurus nobilis L. leaves extracts obtained by solvent-free microwave extraction and investigation of their antioxidant activity. Journal of Essential Oil Research, 28(3), 202-210

Benli, H., Şahin, P., & Ağçam, E. (2024). Incorporating bay leaf extract (Laurus nobilis L.) and determining the quality attributes of Turkish fermented sausage (sucuk). Food Science & Nutrition, 12, 2473 - 2487.

Berendika, M., Domjanić Drozdek, S., Odeh, D., Oršolić, N., Dragičević, P., Sokolović, M., Garofulić, I.E., Đikić, D., & Jurčević, I.L. (2022). Beneficial effects of laurel (Laurus nobilisL.) and myrtle(Myrtus communis L.) extract on rat health. Molecules, 27(2), 581.

Berghout, J. A. M., Venema, P., Boom, R. M., & Van der Goot, A. J. (2015). Comparing functional properties of concentrated protein isolates with freezedried protein isolates from lupin seeds. Food Hydrocolloids, 51, 346–354. 10.1016/j.foodhyd.2015.05.017. Bohrer, B. M. (2019). An investigation of the formulation and nutritional composition of modern meat analogue products. Food Science and Human Wellness, 8, 320–329.

Bilen, S., & Bulut, M. (2010). Effects of laurel (Laurus nobilis) on the non-specific immune responses of rainbow trout (Oncorhynchus mykiss, Walbaum). Journal of Animal and Veterinary Advances, 9(8), 1275-1279.

Bińkowska, W., Szpicer, A., Stelmasiak, A., Wojtasik-Kalinowska, I. et Półtorak, A. (2024). Microencapsulation des polyphénols et leur application en technologie alimentaire. Sciences appliquées .

Bińkowska, W., Szpicer, A., Stelmasiak, A., Wojtasik-Kalinowska, I., & Półtorak, A. (2024). Microencapsulation of Polyphenols and Their Application in Food Technology. Applied Sciences.

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.

Bobrysheva, T. N., Anisimov, G. S., Zolotoreva, M. S., Evdokimov, I. A., Budkevich, R. O., &Muravyev, A. K. (2025). Encapsulated polyphenols in functional food production. Foods and Raw materials, 13(1), 18-34.

Bohrer, B. M. (2019). An investigation of the formulation and nutritional composition of modern meat analogue products. Food Science and Human Wellness, 8, 320–329. 10.1016/j.fshw.2019.11.006.

Bourebaba, N., Kornicka-Garbowska, K., Marycz, K., Bourebaba, L., & Kowalczuk, A. (2021). Laurus nobilis ethanolic extract attenuates hyperglycemia and hyperinsulinemia-induced insulin resistance in HepG2 cell line through the reduction of oxidative stress and improvement of mitochondrial biogenesis–Possible implication in pharmacotherapy. Mitochondrion, 59, 190-213.

Bravo, L. (1998). Polyphenols: chemistry, dietary sources, metabolism, and nutritional significance. Nutrition Reviews, 56(11), 317-333.

Bryant, C. J. (2019). We can not keep meating like this: Attitudes towards Vegetarian and Vegan diets in the United Kingdom. Sustainability, 11(23). 10.3390/su11236844.

Buto, S.K., Tsang, T.-K., Sielaff, G.W., Gutstein, L.L., & Meiselman, M.S. (1990). Bay leaf impaction in the esophagus and hypopharynx. Annals of Internal Medicine, 113(1), 82-83.

Cakmak, H., Kumcuoglu, S., & Tavman, S. (2013). Thin layer drying of bay leaves Laurus nobilis L. in conventional and microwave oven. Akademik Gıda, 11(1), 20-26.

Calderón-Oliver, M., & Ponce-Alquicira, E. (2022). The role of microencapsulation in food application. Molecules, 27(5), 1499.

Calderón-Oliver, M., et Ponce-Alquicira, E. (2022). Le rôle de la microencapsulation dans les

applications alimentaires. Molecules, 27.
Cantín, C.M., Palou, L., Bremer, V., Michailides, T.J., & Crisosto, C.H. (2011). Evaluation of the use of sulfur dioxide to reduce postharvest losses on dark and green figs. Postharvest Biology and Technology, 59(2), 150-158
Caputo, L., Nazzaro, F., Souza, L.F., Aliberti, L., De Martino, L., Fratianni, F., Coppola, R., &De Feo,V. (2017). Laurus nobilis: Composition of essential oil and its biological activities. Molecules, 22(6), 930.

Cegledi, E., Garofulić, IE, Zorić, Z., Roje, M., et Dragović-Uzelac, V. (2022). Effet de l'encapsulation par séchage par pulvérisation sur les propriétés de la poudre d'extrait de feuille d'ortie, les polyphénols et leur biodisponibilité. Foods , 11 (18), 2852.
Chaaben, H., Motri, S., & Ben Selma, M. (2015). Etude des proprietes physico-chimiques de l'huile de fruit de Laurus nobilis et effet de la maceration par les fruits et les feuilles deLaurus nobilis sur les proprietes physico-chimiques et la stabilite oxydative de l'huile d'olive [Study of physico-chemical properties of Laurus nobilis fruit oil and the effect of maceration by the fruits and leaves of Laurus nobilis on the physico-chemical properties and oxidative stability of olive oil]. Journal of New Sciences, 8, 873-880.
Chahal, K., Bansal, R., & Kaur, R. (2016). Chemistry and insecticidal potential of bay leaf essential oil against stored grain pest of wheat. Journal of Applied and Natural Science, 8(4), 2049-2054.
Chahal, K., Kaur, M., Bhardwaj, U., Singla, N., & Kaur, A. (2017). A review on chemistry and biological activities of Laurus nobilis L. essential oil. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 6(4), 1153-1161.
Chalchat, J., Özcan, M., & Figueredo, G. (2011). The composition of essential oils of different parts of laurel, mountain tea, sage and ajowan. Journal of Food Biochemistry, 35(2), 484-499.
Chang, C., Tu, S., Ghosh, S., & Nickerson, M. T. (2015). Effect of pH on the interrelationships between the physicochemical, interfacial and emulsifying properties for pea, soy, lentil and canola protein isolates. Food Research International, 77, 360–367. 10.1016/J.FOODRES.2015.08.012.
Chbili, C., Maoua, M., Selmi, M., Mrad, S., Khairi, H., Limem, K., & Saguem, S., Ben Fredj, M. (2020). Evaluation of daily Laurus nobilis tea consumption on lipid profile biomarkers in healthy volunteers. Journal of the American College of Nutrition, 39(8), 733-738.
Chernenko, S. (2025). Encapsulation des polyphénols dans les produits de boulangerie : une stratégie pour améliorer la stabilité et l'activité antioxydante. Audit technologique et réserves de production .
Chiang, J. H., Tay, W., Ong, D. S. M., Liebl, D., Ng, C. P., & Henry, C. J. (2021).
Physicochemical, textural and structural characteristics of wheat gluten-soy protein composited meat analogues prepared with the mechanical elongation method. Food Structure, 28. 10.1016/J.FOOSTR.2021.100183.
Cvetković, D., Ranitović, A., Šeregelj, V., Šovljanski, O., Vulić, J. J., Jović, B., & Pavlović, V. (2020). Encapsulation of peach waste extracts in Saccharomyces cerevisiae cells. Journal of the Serbian Chemical Society.
Cvetković, D., Ranitović, A., Šeregelj, V., Šovljanski, O., Vulić, JJ, Jović, B. et Pavlović, V. (2020). Encapsulation d'extrait de déchets de pêche dans des cellules de Saccharomyces cerevisiae. Journal de la Société chimique serbe.
Dadkhodazade, E., Khanniri, E., Khorshidian, N., Hosseini, S. M., Mortazavian, A., & Kia, E. M. (2021). Yeast cells for encapsulation of bioactive compounds in food products: A review. Biotechnology Progress, 37.

Dadkhodazade, E., Khanniri, E., Khorshidian, N., Hosseini, SM, Mortazavian, A. et Kia, EM (2021). Cellules de levure pour l'encapsulation de composés bioactifs dans les produits alimentaires : une revue. Biotechnology Progress, 37.
Dadkhodazade, E., Mohammadi, A., Shojaee-Aliabadi, S., Mortazavian, A., Mirmoghtadaie, L., & Hosseini, S. M. (2018). Yeast Cell Microcapsules as a Novel Carrier for Cholecalciferol Encapsulation: Development, Characterization and Release Properties. Food Biophysics, 13, 404-411.
Daher, C.F., Taleb, R.I., Mroueh, M.A., Nehmeh, B., Araji, H., Rawan, H.C., Aimee, M. D.,

Kamar, H.E., El Khoury, M.K., El Hayek, P.F., Faddoul, H.T., Feghali, E.J., Ghanem, A.G.,
Haydar, T.P., Jammoul, A.R., Nasra, S.H., Nouhad, S., Tahan, D.G., Daher, J.C., Tannoury, E., & Shebaby, W.N. (2021). Laurus nobilis leaves extract protects against high fat dietinduced type 2 Diabetes in rats. Journal of Pharmacognosy and Phytotherapy, 13(3), 82-90.

Dall'Acqua, S., Cervellati, R., Speroni, E., Costa, S., Guerra, M.C., Stella, L., Greco, E., & Innocenti, G. (2009). Phytochemical composition and antioxidant activity of Laurus nobilisL. leaf infusion. Journal of Medicinal Food, 12(4), 869-876.

Deby-Dupont, G., Deby, C., & Lamy, M. (2002). Données actuelles sur la toxicité de l'oxygène [Current data on oxygen toxicity]. Réanimation, 11(1), 28-39.

Dekkers, B. L., Nikiforidis, C. V., & van der Goot, A. J. (2016). Shear-induced fibrous structure formation from a pectin/SPI blend. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 36, 193–200. 10.1016/j.ifset.2016.07.003.

Derwich, E., Benziane, Z., Boukir, A., Mohamed, S., & Abdellah, B. (2009). Chemical composition and antibacterial activity of leaves essential oil of Laurus nobilis from Morocco. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 3(4), 3818-3824.

Di Carlo, G., Mascolo, N., Izzo, A.A., & Capasso, F. (1999). Flavonoids: old and new aspects of a class of natural therapeutic drugs. Life Science Journal, 65(4), 337-353

Dias, M.I., Barros, L., Duenas, M., Alves, R.C., Oliveira, M.B., Santos-Buelga, C., & Ferreira,
I.C. (2014). Nutritional and antioxidant contributions of Laurus nobilis L. leaves: would be more suitable a wild or a cultivated sample? Food Chemistry, 156, 339-346

Dobroslavić, E., Elez Garofulić, I., Zorić, Z., Pedisić, S., & Dragović-Uzelac, V. (2021). Polyphenolic characterization and antioxidant capacity of Laurus nobilis L. leaf extracts obtained by green and conventional extraction techniques. Processes, 9(10), 1840.

Dobroslavić, E., Elez Garofulić, I., Zorić, Z., Pedisić, S., Roje, M., & Dragović-Uzelac, V. (2023). Physicochemical properties, antioxidant capacity, and bioavailability of Laurus nobilis L. leaf polyphenolic extracts microencapsulated by spray drying. Foods, 12(9), 1923.

Dobroslavić, E., Repajić, M., Dragović-Uzelac, V. et Garofulić, IE (2022). Isolement des polyphénols des feuilles de Laurus nobilis : revue des techniques actuelles et perspectives d'avenir. Foods, 11.

Dobroslavić, E., Repajić, M., Dragović-Uzelac, V., & Elez Garofulić, I. (2022). Isolation of Laurus nobilis leaf polyphenols: A review on current techniques and future perspectives. Foods, 11(2), 235.

Dobroslavić, E., Zorić, Z., Dragović-Uzelac, V., & Elez Garofulić, I. (2023). Microencapsulation of Laurus nobilis L. leaf extract in alginate-based system via electrostatic extrusion. Foods, 12(17), 3242.

Domínguez, R., Pateiro, M., Munekata, P. E., McClements, D. J., & Lorenzo, J. M. (2021). Encapsulation of bioactive phytochemicals in plant-based matrices and application as additives in meat and meat products. Molecules, 26(13), 3984.

Duletić-Laušević, S., Oalđe, M., & Aradski, A.A. (2019). In vitro evaluation of antioxidant, antineurodegenerative and antidiabetic activities of Ocimum basilicum L., Laurus nobilis L. leavesand Citrus reticulata Blanco peel extracts. Lekovite Sirovine, 39, 60-68.

Díaz-Maroto, M.C., Pérez-Coello, M.S., & Cabezudo, M.D. (2002). Effect of drying method on the volatiles in bay leaf (Laurus nobilis L.). Journal of Agricultural and Food Chemistry,50(16), 4520-4524.

Elefe, R.G. (2021). Total phenolics content/antioxidant potential of 8 selected plants in southern Nigeria. International Journal of Pharmaceutical and Phytopharmacological Research,11(3), 11-14.

Elmastaş, M., Gülçin, I., Işildak, Ö., Küfrevioğlu, Ö.İ., İbaoğlu, K., & Aboul-Enein, H.Y. (2006). Radical scavenging activity and antioxidant capacity of bay leaf extracts. Journal of the Iranian Chemical Society, 3(3), 258-266.

Elzebroek, T., & Wind, K. (2008). Guide to cultivated plants. CABI.

Erler, F., Ulug, I., & Yalcinkaya, B. (2006). Repellent activity of five essential oils against Culex pipiens. Fitoterapia, 77(7-8), 491-494.

Erlund, I. (2004). Review of the flavonoid's quercetin, hesperetin, and naringenin. Dietary sources,

bioactivities, bioavailability, and epidemiology. Nutrition Research, 24(10), 851-874.
Fang, F., Sang, S., Chen, K.Y., Gosslau, A., Ho, C.-T., & Rosen, R.T. (2005). Isolation andidentification of cytotoxic compounds from Bay leaf (Laurus nobilis). Food Chemistry,93(3), 497-501.
Fang, Z., & Bhandari, B. (2010). Encapsulation of polyphenols–a review. Trends in food science & technology, 21(10), 510-523.
Franchomme, P., Jollois, R., & Pénoël, D. (2001). L'aromathérapie exactement : encyclopédie de l'utilisation thérapeutique des extraits aromatiques [Aromatherapy exactly: encyclopedia of the therapeutic use of aromatic extracts]. Edition Roger Jollois.
Fraser, R., Brown, P.O., Karr, J., Holz-Schietinger, C., & Cohn, E. (2017). Methods and compositions for affecting the flavor and aroma profile of consumables.
Funk, A., Sütterlin, B., & Siegrist, M. (2020). The stereotypes attributed to hosts when they offer an environmentally-friendly vegetarian versus a meat menu. Journal of Cleaner Production, 250. 10.1016/j.jclepro.2019.119508.
Gade, S. (2020), In depth study of plant-based meat products introduced by IMPOSSIBLE. Savitribai Phule Pune University. 10.13140/RG.2.2.23846.14404.

Gasparyan, G., Tiratsuyan, S., Kazaryan, S., & Vardapetyan, H. (2015). Effect of Laurus nobilisextract on the functioning of liver against CCl4 induced toxicity. Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences, 3(2), 174-183.
Geerts, M. E. J., Dekkers, B. L., van der Padt, A., & van der Goot, A. J. (2018). Aqueous fractionation processes of soy protein for fibrous structure formation. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 45, 313–319. 10.1016/j.ifset.2017.12.002.
Geerts, P., Rammeloo, J., & Van Cauteren, G. (2002). Laurus nobilis: le livre du laurier [Laurus nobilis : the book of the laurel]. Ludion.
Godschalk-Broers, L., Sala, G., & Scholten, E. (2022). Meat Analogues: Relating Structure to Texture and Sensory Perception. Foods, 11.
Goot, A. J., Der, V., Pelgrom, P. J. M., Berghout, J. A. M., Geerts, M. E. J., Jankowiak, L., et al., (2016). Concepts for further sustainable production of foods. Journal of Food Engineering, 168, 42–51. 10.1016/j.jfoodeng.2015.07.010.
Grabowska, K. J., Zhu, S., Dekkers, B. L., De Ruijter, N. C. A., Gieteling, J., & Van Der Goot, A.
J. (2016). Shear-induced structuring as a tool to make anisotropic materials using soy protein concentrate. Journal of Food Engineering, 188, 77–86. 10.1016/j.jfoodeng.2016.05.010.
Grgić, J., Šelo, G., Planinić, M., Tišma, M., & Bucić-Kojić, A. (2020). Role of the Encapsulation in Bioavailability of Phenolic Compounds. Antioxidants, 9.
Grigore-Gurgu, L., Dumitrașcu, L., & Aprodu, I. (2025). Aromatic Herbs as a Source of Bioactive Compounds: An Overview of Their Antioxidant Capacity, Antimicrobial Activity, and Major Applications. Molecules, 30.
Guenane, H., Gherib, A., Carbonell-Barrachina, Á., Cano-Lamadrid, M., Krika, F., Berrabah, M., Maatallah M., & Bakchiche, B. (2016). Minerals analysis, antioxidant and chemical composition of extracts of Laurus nobilis from southern Algeria. Journal of Materials and Environmental Science, 7(11), 4253-4261.
Guiné, R. P. (2022). Textural properties of bakery products: A review of instrumental and sensory evaluation studies. Applied Sciences, 12(17), 8628.
Guo, Z., Teng, F., Huang, Z., Lv, B., Lv, X., Babich, O., et al., (2020). Effects of material characteristics on the structural characteristics and flavor substances retention of meat analogs. Food Hydrocolloids, 105. 10.1016/J.FOODHYD.2020.105752.
Guyony, V., Fayolle, F., & Jury, V. (2023). High moisture extrusion of vegetable proteins for making fibrous meat analogs: A review. Food Reviews International, 39(7), 4262-4287.
Gümüşay, Ö. A., 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.
Günal-Köroğlu, D., Bilgin, A. B., Karabulut, G., Saricaoglu, B., &Capanoglu, E. (2024). Encapsulation of hydrophobic compounds in yeast cells: methods, characterization, and applications. Exploration of foods and foodomics, 2(3), 252-274.

Günal-Köroğlu, D., Lorenzo, J. M., &Capanoglu, E. (2023). Plant-Based Protein-Phenolic Interactions: Effect on different matrices and in vitro gastrointestinal digestion. Food research international, 173, 113269.

Hagmann, D., Siegrist, M., & Hartmann, C. (2019). Meat avoidance: Motives, alternative proteins and diet quality in a sample of Swiss consumers. Public Health Nutrition, 22(13), 2448–2459. 10.1017/S1368980019001277.

Hanif, M., Nawaz, H., Khan, M., & Byrne, H. (2020). Medicinal plants of South Asia, Novel sources for drug discovery: Bay Leaf. Elsevier.

Haque, M. A., Timilsena, Y. P., & Adhikari, B. (2016). Food proteins, structure, and function, reference module in food science. Elsevier. 10.1016/B978-0-08-100596-5.03057-2.

Harborne, J.B., & Baxter, H. (1999). The handbook of natural flavonoids. Wiley.

Hartmann, C., & Siegrist, M. (2017). Consumer perception and behaviour regarding sustainable protein consumption: A systematic review. Trends in Food Science & Technology, 61, 11–25. 10.1016/j.tifs.2016.12.006.

Hartmann, C., & Siegrist, M. (2020). Our daily meat: Justification, moral evaluation and willingness to substitute. Food Quality and Preference, 80. 10.1016/j.foodqual.2019.103799. Jiang, J., & Xiong, Y. L. (2016). Natural antioxidants as food and feed additives to promote health benefits and quality of meat products: A review. Meat Science, 120, 107–117. Joshi, K., & Kumar, S. (2015). Meat analogues: Plant based alternatives to meat productsa review. International Journal of Food Fermentation &Technology, 5(2), 107–119.

Hashemi, B., Assadpour, E., Zhang, F., & Jafari, S. M. (2025). Interactions between β-lactoglobulin and polyphenols: Mechanisms, properties, characterization, and applications. Advances in Colloid and Interface Science, 339, 103424.

Hassan, S.B., Gullbo, J., Hu, K., Berenjian, S., Morein, B., & Nygren, P. (2013). The nanoparticulate quillaja saponin BBE is selectively active towards renal cell carcinoma. Anticancer Research, 33(1), 143-151.

Hatip, G., & Karaman, K. (2024). Yeast cell biocarrier for the encapsulation of ascorbic acid: effect of plasmolysis process, suspension media and ascorbic acid levels on the physicochemical, morphological and bioactive properties of microcapsules.. Journal of the science of food and agriculture.

Havsteen, B.H. (2002). The biochemistry and medical significance of the flavonoids. Pharmacology & Therapeutics, 96(2-3), 67-202.

Heusala, H., Sinkko, T., Sözer, N., Hytönen, E., Mogensen, L., & Knudsen, M. T. (2020). Carbon footprint and land use of oat and faba bean protein concentrates using a life cycle assessment approach. Journal of Cleaner Production, 242, Article 118376. 10.1016/J.JCLEPRO.2019.118376.

Hossain, M.H., Jahan, F., Howlader, M., Dey, S.K., Hira, A., Ahmed, A., & Sarkar, R. (2012). Evaluation of antiinflammatory activity and total flavonoids content of Manilkara zapota(linn.) bark. International Journal of Pharmaceutical and Phytopharmacological Research,2(1), 35-39.

Hu, F. B., Otis, B. O., & McCarthy, G. (2019). Can plant-based meat alternatives be part of a healthy and sustainable diet? JAMA, 322(16), 1547–1548. 10.1001/JAMA.2019.13187.

Ilić, Z. S., Stanojević, L., Milenković, L., Šunić, L., Milenković, A., Stanojević, J., & Cvetković,

D. (2024). Chemical Profiling of Essential Oils from Main Culinary Plants—Bay (Laurus nobilis L.) and Rosemary (Rosmarinus officinalis L.) from Montenegro. Horticulturae.

Iurciuc, C. E., Atanase, L. I., Jerome, C., Sol, V., Martin, P., Popa, M., &Ochiuz, L. (2021). Polysaccharides-based complex particles' protective role on the stability and bioactivity of immobilized curcumin. International Journal of Molecular Sciences, 22(6), 3075.

Jaradat, N., Hawash, M., Qaoud, M. T., Al-Maharik, N., Qadi, M., Hussein, F., Issa, L., Saleh, A., Saleh, L., & Jadallah, A. (2024). Biological, phytochemical and molecular docking characteristics of Laurus nobilis L. fresh leaves essential oil from Palestine. BMC Complementary Medicine and Therapies, 24.

Jemâa, J.M.B., Tersim, N., Toudert, K.T., & Khouja, M.L. (2012). Insecticidal activities of essential oils from leaves of Laurus nobilis L. from Tunisia, Algeria and Morocco, and comparative

chemical composition. Journal of Stored Products Research, 48, 97-104.
Judge, M., & Wilson, M. S. (2019). A dual-process motivational model of attitudes towards vegetarians and vegans. European Journal of Social Psychology, 49(1), 169–178. 10.1002/ejsp.2386.
Kaleda, A., Talvistu, K., Vaikma, H., Tammik, M. L., Rosenvald, S., & Vilu, R. (2021). Physicochemical, textural, and sensorial properties of fibrous meat analogs from oatpea protein blends extruded at different moistures, temperatures, and screw speeds. Future Foods, 4. 10.1016/J.FUFO.2021.100092.
Karaman, K. (2021). Fabrication of gallic acid loaded yeast (Saccharomyces cerevisiae) microcapsules: Effect of plasmolysis treatment and solvent type on bioactivity and release kinetics. Lwt, 148, 111640.
Karonen, M. (2022). Insights into polyphenol–lipid interactions: Chemical methods, molecular aspects and their effects on membrane structures. Plants, 11(14), 1809.
Kaurinović, B., et Vaštag, D. (2019). Flavonoïdes et acides phénoliques : antioxydants naturels potentiels. Antioxidants .
Kemp, P.R. (1983). Phenological patterns of Chihuahuan Desert plants in relation to the timing of water availability. Journal of Ecology, 71, 427-436.
Khaled Khodja, Y., Bachir-bey, M., Ladjouzid, R., Katiac, D., & Khettalb, B. (2021). In vitroantioxidant and antibacterial activities of phenolic and alkaloid extracts of Laurus nobilis. South Asian Journal of Experimental Biology, 11(3), 345-354.
Khaled Khodja, Y., Dahmoune, F., Bachir bey, M., Madani, K., & Khettal, B. (2020). Conventional method and microwave drying kinetics of Laurus nobilis leaves: effects on phenolic compounds and antioxidant activity. Brazilian Journal of Food Technology, 23, e2019214.
Khan, A., Zaman, G., & Anderson, R.A. (2009). Bay leaves improve glucose and lipid profile of people with type 2 diabetes. Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition, 44(1), 52-56.

Kim, K., Choi, B., Lee, I., Lee, H., Kwon, S., Oh, K., et al., (2011). Bioproduction of mushroom mycelium of Agaricus bisporus by commercial submerged fermentation for the production of meat analogue. Journal of the Science of Food and Agriculture, 91, 1561– 1568. 10.1002/jsfa.4348.
Kiss, A., Papp, V., Pál, A., Prokisch, J., Mirani, S., Toth, BE et Alshaal, T. (2025). Étude comparative de la capacité antioxydante de diverses matrices alimentaires : applicabilité, pertinence et intercorrélation de plusieurs analyses pour évaluer le statut en polyphénols et en antioxydants. Antioxidants, 14.
Konovalov, D.A., & Alieva, N.M. (2019). Phenolic compounds of Laurus nobilis. Journal of Pharmacy and Pharmacology, 7, 244-259.
Kos, Ivica ; Bedeković, Dalibor ; Širić, Ivan ; Vnučec, Ivan ; Pećina, Mateja ; Glumpak, Ana ; Carović Stanko, Klaudija .(2017),Technological characterization and consumer perception of dry fermented game sausages with bay leaf (Laurus nobilis L.) essential oil // Journal of Central European agriculture, 18 (2017), 4; 794-805. doi: 10.5513/jcea01/18.4.1961.
Krintiras, G. A., Göbel, J., Van Der Goot, A. J., & Stefanidis, G. D. (2015). Production of structured soy-based meat analogues using simple shear and heat in a Couette cell. Journal of Food Engineering, 160, 34–41. 10.1016/j.jfoodeng.2015.02.015. Kumar, P., Chatli, M. K., Mehta, N., Singh, P., Malav, O. P., & Verma, A. K. (2017). Meat analogues: Health promising sustainable meat substitutes. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 57, 923–932.
Kumar, P., Chatli, M. K., Mehta, N., Singh, P., Malav, O. P., & Verma, A. K. (2017). Meat analogues: Health promising sustainable meat substitutes. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 57, 923–932. 10.1080/10408398.2014.939739.
Kumari, S., Alam, A. N., Hossain, M. J., Lee, E.-Y., Hwang, Y., & Joo, S.-T. (2023). Sensory Evaluation of Plant-Based Meat: Bridging the Gap with Animal Meat, Challenges and Future Prospects. Foods, 13.
Kuzgunkaya, E.H., & Hepbasli, A. (2007). Exergetic evaluation of drying of laurel leaves in a vertical ground-source heat pump drying cabinet. International Journal of Energy Research,31(3), 245-258.
Kyriakopoulou, K., Dekkers, B., & van der Goot, A. J. (2019). Plant-based meat analogues. Sustainable Meat Production and Processing, 103–126. 10.1016/B978-0-12-814874-7.00006-7. Konstantina

Kyriakopoulou. (2019). Plant-based meat analogues. Food process engineering, Wageningen University, Wageningen, the Netherlands. Sustainable Meat Production and Processing, 10, 1016.

Kılıç, NF, Şekeroğlu, G. et Kaya, A. (2025). Impact de la formulation sur les propriétés rhéologiques, texturales et sensorielles de la pâte à tartiner à la pistache. Foods, 14.

Ladjal-Ettoumi, Y., Boudries, H., Chibane, M., & Romero, A. (2016). Pea, chickpea and lentil protein isolates: Physicochemical characterization and emulsifying properties. Food Biophysics, 11, 43–51. 10.1007/s11483-015-9411-6.

Laib, D. E., Laib, I., Bendif, H., Alsalamah, S. A., Taha, T. H., Boufahja, F., ... &Garzoli, S. (2026). Plasmolyzed yeast cell system for the encapsulation of Pulicariaodora polyphenols: RSM-based process optimization and functional characterization. Food Science and Biotechnology, 1-16.

Lemken, D., Spiller, A., & Schulze-Ehlers, B. (2019). More room for legume – Consumer acceptance of meat substitution with classic, processed and meat-resembling legume products. Appetite, 143 Article 104412. 10.1016/j.appet.2019.104412.

Ligarda-Samanez, C. A., Choque-Quispe, D., Moscoso-Moscoso, E., Ramos-Pacheco, B. S., Palomino-Rincón, H., & Peralta-Guevara, D. E. (2025). Microencapsulation of bioactive compounds from HesperomelesescalloniifoliaSchltdl (Capachu) in quinoa starch and Tara Gum. CyTA - Journal of Food, 23(1).

Lopez, F., Bowles, A., Gul, M., Clapham, D., Ernest, T., & Tuleu, C. (2016). Effect of formulation variables on oral grittiness and preferences of multiparticulate formulations in adult volunteers.. European journal of pharmaceutical sciences : official journal of the European Federation for Pharmaceutical Sciences, 92, 156-62 .

Lorenzo, J. M., Munekata, P. E. S., Pateiro, M., Campagnol, P. C. B., & Domínguez, R. (2016). Healthy Spanish salchichón enriched with encapsulated n− 3 long chain fatty acids in konjac glucomannan matrix. Food Research International, 89, 289-295.

Lu, F., Kuhnle, G. K., & Cheng, Q. (2018). The effect of common spices and meat type on the formation of heterocyclic amines and polycyclic aromatic hydrocarbons in deepfried meatballs. Food Control, 92, 399–411. 10.1016/j.foodcont.2018.05.018.

Lu, M., Guo, Y., Ji, L., Xue, H., Li, X., & Tan, J. (2025). Insights into interactions between polyphenols and proteins and their applications: An updated overview. Journal of Agriculture and Food Research, 102269.

Lu, M., Yuan, B., Zeng, M., & Chen, J. (2011). Antioxidant capacity and major phenolic compounds of spices commonly consumed in China. International Food Research Journal,44(2), 530-536.

Ma, D., Yang, B., Zhao, J., Yuan, D., & Li, Q. (2024). Advances in protein-based microcapsules and their applications: A review. International Journal of Biological Macromolecules, 263, 129742.

Mahmood, S. F. (2026). Evaluation of the impact of methanolic extract of bay leaf oil on enhancing the quality of plant-based meat. Acta PeriodicaTechnologica, (00), 3-3.

Makriyanni, K.-M., & Yanni, A. (2026). From Cell Walls to Food Products: Health Benefits, Functional Properties and Future Challenges of Yeast β-Glucans.. Nutrients, 18 5.

Malav, O.P., Talukder, S., Gokulakrishnana, P., & Chand, S. (2015). Critical reviews in food science and nutrition, 55(9): 1241–1245. 10.1080/10408398.2012.689381.

Mansour, R. B., Falleh, H., Hammami, M., Hadid, F. B., Barros, L., Tarchoun, N., ... &Ksouri, R. (2025). Optimizing the encapsulation of the refined extract of squash peels for functional food applications: A sustainable approach to reduce food waste. Open Life Sciences, 20(1), 20251124.

Mehta, N., Kumar, P., Verma, A. K., Umaraw, P., Kumar, Y., Malav, O. P., ... & 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.

Mehta, N., Kumar, P., Verma, A., Umaraw, P., Kumar, Y., Malav, O., Sazili, A., Domínguez, R. et Lorenzo, J. (2022). La microencapsulation, une technique prometteuse pour l'application de composés bioactifs dans l'industrie alimentaire : une revue exhaustive. Applied Sciences .

Merghni, A., Marzouki, H., Hentati, H., Aouni, M., & Mastouri, M. (2016). Antibacterial and antibiofilm activities of Laurus nobilis L. essential oil against Staphylococcus aureus strains

associated with oral infections. Current Research in Translational Medicine, 64(1), 29-34.
Mihalcea, L., Barbu, V., Enachi, E., Andronoiu, D. G., Râpeanu, G., Stoica, M., ... &Stănciuc, N. (2020). Microencapsulation of red grape juice by freeze drying and application in jelly formulation. Food Technology and Biotechnology, 58(1), 20-28.
Mikus, M., & Galus, S. (2025). The effect of phenolic acids on the sorption and wetting properties of apple pectin-based packaging films. Molecules, 30(9), 1960.
Miller, M. (2018). The 15 best vegetarian and vegan meat substitutes. Women's Health. Accessed https://www.womenshealthmag.com/food/a21566428/beyondmeatburger-ingredients/. Accessed date: 5 January 2020.
Mirbadal Zadeh, R., & Shirdel, Z. (2011). Antidiabetic effect of Laurus nobilis hydroalcoholic extract in rat. Journal of North Khorasan University of Medical Sciences, 3(2), 81-85.
Moghtader, M., & Salari, H. (2012). Comparative survey on the essential oil composition from the leaves and flowers of Laurus nobilis L. from Kerman province. Journal of Ecology and the Natural Environment, 4(6), 150-153.
Mohammed, R.R., Omer, A.K., Yener, Z., Uyar, A., & Ahmed, A.K. (2021). Biomedical effects of Laurus nobilis L. leaf extract on vital organs in streptozotocin-induced diabetic rats: Experimental research. Annals of Medicine and Surgery, 61, 188-197.
Montoro, P., Braca, A., Pizza, C., & De Tommasi, N. (2005). Structure–antioxidant activity relationships of flavonoids isolated from different plant species. Food Chemistry, 92(2), 349-355.
Morais, S.M.d., Cavalcanti, E.S., Costa, S.M.O., & Aguiar, L.A. (2009). Antioxidant action of teas and seasonings more consumed in Brazil. Revista Brasileira de Farmacognosia, 19, 315-320. https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S0102-695X2009000200023
N.Mehta, PavanKumar, A.Verma, P.Umaraw, YogeshKumar, O.Malav, A.Sazili, R.Domínguez, J.Lorenzo.(2022).La microencapsulation, une technique prometteuse pour l'application de composés bioactifs dans l'industrie alimentaire : une revue exhaustive.
Nabila, B., Piras, A., Fouzia, B., Falconieri, D., Kheira, G., Fedoul, F.-F., & Majda, S.-R. (2022). Chemical composition and antibacterial activity of the essential oil of Laurus nobilis leaves. Natural Product Research, 36(4), 989-993.
Naczk, M., & Shahidi, F. (2004). Extraction and analysis of phenolics in food. Journal of chromatography A, 1054(1-2), 95-111.
Nasukhova, N.M., Logvinenko, L.A., Kharchenko, A.L., & Konovalov, D.A. (2019). Phenolic compounds of Laurus nobilis. Journal of Pharmacy and Pharmacology, 5(3), 200-221.
Nawrocka, A., Szymanska-Chargot, M., Mis, A., Wilczewska, A. Z., & Markiewicz, K. H. (2017). Aggregation of gluten proteins in model dough after fibre polysaccharide addition. Food Chemistry, 231, 51–60. 10.1016/j.foodchem. 2017.03.117.

Nayak, S., Nalabothu, P., Sandiford, S., Bhogadi, V., & Adogwa, A. (2006). Evaluation of wound healing activity of Allamanda cathartica L. and Laurus nobilis L. extracts on rats. BMC Complement Altern Med, 6(1), 1-6.
Neder-Suárez, D., Meléndez-Pizarro, C. O., Pérez-Carrillo, E., Vázquez-Rodríguez, J. A., Valdez-Cárdenas, M. D. C., Ruiz-Gutiérrez, M. G., ... & Quintero-Ramos, A. (2025). Impact of Vegetal Protein on the Physicochemical and Microstructural Properties of Microencapsulated Mexican Red Pitaya (Stenocereusthurberi) Juice. AppliedChem, 5(2), 12.
Nithya, T., Jayanthi, J., & Ragunathan, M. (2016). Antioxidant activity, total phenol, flavonoid, alkaloid, tannin, and saponin contents of leaf extracts of Salvinia molesta DS Mitchell (1972). Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research, 9(1), 200-203.
Ntone, E., Qu, Q., Gani, K. P., Meinders, M. B. J., Sagis, L. M. C., Bitter, J. H., et al., (2022). Sinapic acid impacts the emulsifying properties of rapeseed proteins at acidic pH. Food Hydrocolloids, 125, Article 107423. 10.1016/J.FOODHYD.2021. 107423.
Ooms, N., Jansens, K. J. A., Pareyt, B., Reyniers, S., Brijs, K., & Delcour, J. A. (2018). The impact of disulfide bond dynamics in wheat gluten protein on the development of fermented pastry crumb. Food Chemistry, 242, 68–74. 10.1016/j.foodchem.2017.09.007.
Orcutt, M.W., Sandoval, A., Mertle, T.J., Mueller, I., Altemueller, P.A., & Downey, J. (2008). Meat compositions comprising colored structured protein products. US20080260913A1.

Ordoudi, S.A., Papapostolou, M., Nenadis, N., Mantzouridou, F.T., & Tsimidou, M.Z. (2022). Bay Laurel (Laurus nobilis L.) essential oil as a food preservative source: Chemistry, quality control, activity assessment, and applications to olive industry products. Foods, 11(5), 752.

Osen, R., & Schweiggert-Weisz, U. (2016). High-moisture extrusion: Meat analogues, reference module in food science. Elsevier. 10.1016/B978-0-08-100596-5.03099-7.

Ouafi, N., Moghrani, H., Benaouada, N., Yassaa, N., Maachi, R., & Younsi, R. (2015). Moisture sorption isotherms and heat of sorption of Algerian bay leaves (Laurus nobilis). Maderas: Ciencia y Tecnologia, 17(4), 759-772.

Ozcan, B., Esen, M., Sangun, M.K., Coleri, A., & Caliskan, M. (2010). Effective antibacterial and antioxidant properties of methanolic extract of Laurus nobilis seed oil. Journal of Environmental Biology, 31(5), 637-641.

Papageorgiou, V., Mallouchos, A., & Komaitis, M. (2008). Investigation of the antioxidant behavior of air-and freeze-dried aromatic plant materials in relation to their phenolic content and vegetative cycle. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 56(14), 5743-5752.

Parthasarathy, V., Zachariah, T.J., & Chempakam, B. (2008). Chemistry of spices: Bay Leaf. CABI.

Patrakar, R., Mansuriya, M., & Patil, P. (2012). Phytochemical and pharmacological review onLaurus nobilis. International Journal of Pharmaceutical Chemistry, 1(2), 595-602.

Pech, B., & Bruneton, J. (1982). Alcaloïdes du laurier noble, Laurus nobilis [Bay laurel alkaloids, Laurus nobilis]. Journal of Natural Products, 45(5), 560-563.

Peixoto, L.R., Rosalen, P.L., Ferreira, G.L.S., Freires, I.A., de Carvalho, F.G., Castellano, L.R., & de Castro, R.D. (2017). Antifungal activity, mode of action and anti-biofilm effects of Laurus nobilis Linnaeus essential oil against Candida spp. Archives of Oral Biology, 73, 179-185.

Pematilleke, N., Kaur, M., Adhikari, B. et Torley, P. (2021). Relation entre le profil de texture instrumental et sensoriel des muscles semi-tendineux de bœuf présentant différentes textures. Journal of texture studies .

Peña-Ortiz, M., Serrano, L., Romero, A. A., & García, A. (2023). Bay leaves extracts as active additive for food protective coatings. Foods, 12(20), 3741.

Pietsch, V. L., Emin, M. A., & Schuchmann, H. P. (2017). Process conditions influencing wheat gluten polymerization during high moisture extrusion of meat analog products. Journal of Food Engineering, 198, 28–35. 10.1016/j.jfoodeng.2016.10.027. Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. Science, 360(6392), 987–992. Choudhury, D., Singh, S., Seah, J. S. H., Yeo, D. C. L., & Tan, L. P. (2020). Commercialization of plant-based meat alternatives. Trends in Plant Science, 25, 11.

Pincemail, J., Bonjean, K., Cayeux, K., & Defraigne, J.-O. (2002). Mécanismes physiologiques de la défense antioxydante [Physiological mechanisms of antioxidant defense]. Nutrition Clinique et Métabolisme, 16(4), 233-239.

Pincemail, J., Meurisse, M., Limet, R., & Defraigne, J. (1998). Fumée de cigarette: une source potentielle de production d'espèces oxygénées activées [Cigarette smoke: a potential source of activated oxygen species production]. Medi-Sphère.

Plaskova, A., &Mlcek, J. (2023). New insights of the application of water or ethanol-water plant extract rich in active compounds in food. Frontiers in Nutrition, 10, 1118761.

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.

Pöri, P., Nisov, A., & Nordlund, E. (2022). Enzymatic modification of oat protein concentrate with trans- and protein-glutaminase for increased fibrous structure formation during high-moisture extrusion processing. LWT, 156, Article 113035. 10.1016/J.LWT.2021.113035.

Qazi, H. J., Ye, A., Acevedo-Fani, A., & Singh, H. (2025). Delivery of encapsulated bioactive compounds within food matrices to the digestive tract: recent trends and future perspectives. Critical reviews in food science and nutrition, 65(15), 2921-2942.

Quézel, P., & Santa, S. (1962). Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales [New flora of Algeria and the southern desert regions]. Éditions du Centre National de la Recherche Scientifique.

Raghavan, G., & Orsat, V. (2007). Recent advances in drying of biomaterials for superior quality

bioproducts. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2(1), 20-29.
Ramos Diaz, J. M., Kantanen, K., Edelmann, J. M., Suhonen, H., Sontag-Strohm, T., Jouppila, K., et al., (2022). Fibrous meat analogues containing oat fiber concentrate and pea protein isolate: Mechanical and physicochemical characterization. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 77, Article 102954. 10.1016/J.IFSET.2022. 102954.

Raphaely, T., & Marinova, D. (eds) (2016). Impact of meat consumption on health and environmental sustainability IGI global. 10.4018/978-1-4666-9553-5.
Ravindran, C.A., Murugaiyah, V., Khiang, P.K., & Xavior, R. (2013). Hepatoprotective activity of leaf of methanol extract of Laurus nobilis L. against paracetamol induced hepatotoxicity in rats. Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research, 6(4), 153-157.
Ravindran, P.N. (2017). The encyclopedia of herbs and spices. CABI.
Renzetti, S., Van Den Hoek, I., Stieger, M., & Van Der Sman, R. G. (2025). Decoupling texture from nutritional composition in sugar and fat reduced pound cake: A physico-chemical approach to bakery formulations.. Food research international, 203, 115815 .
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.
Rolan, T., Mueller, I., Mertle, T.J., Swenson, K., Conley, C., Orcutt, Mac, W. et al. (2008). Ground meat and meat analog compositions having improved nutritional properties. US20080268112A1; WO2008083117A2.
Roviello, V., & Roviello, G.N. (2021). Lower COVID-19 mortality in Italian forested areas suggests immunoprotection by Mediterranean plants. Environmental Chemistry Letters,19(1), 699-710.
Saifullah, M., Shishir, MRI, Ferdowsi, R., Rahman, MRT et Van Vuong, Q. (2019). Micro et nano-encapsulation, rétention et libération contrôlée de composés aromatiques : une revue critique. Trends in Food Science & Technology .
Saldanha do Carmo, C., Knutsen, S. H., Malizia, G., Dessev, T., Geny, A., Zobel, H., et al., (2021). Meat analogues from a faba bean concentrate can be generated by high moisture extrusion. Future Foods, 3. 10.1016/J.FUFO.2021. 100014.
Samejima, K., Kanazawa, K., Ashida, H., & Danno, G.-i. (1998). Bay laurel contains antimutagenic kaempferyl coumarate acting against the dietary carcinogen 3-amino-1-methyl-5 H-pyrido [4, 3-b] indole (Trp-P-2). Journal of Agricultural and Food Chemistry,46(12), 4864-4868.
Savadkouhi, NR, Ariaii, P. et Langerodi, MC (2020). Effet d'un extrait végétal encapsulé d'hysope (Hyssopus officinalis L.) dans des nanoémulsions de biopolymères de Lepidium perfoliatum et d'Orchis mascula sur le contrôle de la stabilité oxydative de l'huile de soja. Food Science & Nutrition, 8 , 1264-1271.
Sayyah, M., Saroukhani, G., Peirovi, A., & Kamalinejad, M. (2003). Analgesic and anti-inflammatory activity of the leaf essential oil of Laurus nobilis Linn. Phytotherapy Research,17(7), 733-736.
Sayyah, M., Valizadeh, J., & Kamalinejad, M. (2002). Anticonvulsant activity of the leaf essential oil of Laurus nobilis against pentylenetetrazole-and maximal electroshock-induced seizures. Phytomedicine, 9(3), 212-216.
Schwartz, J. M., Solé, V., Guéguen, J., Ropers, M. H., Riaublanc, A., & Anton, M. (2015). Partial replacement of b-casein by napin, a rapeseed protein, as ingredient for processed foods: Thermoreversible aggregation. LWT-Food Science and Technology, 63, 562–568.
Schweiggert, U., Carle, R., & Schieber, A. (2007). Conventional and alternative processes for spice production–a review. Trends in Food Science & Technology, 18(5), 260-268.
Sellami, I.H., Wannes, W.A., Bettaieb, I., Berrima, S., Chahed, T., Marzouk, B., & Limam, F. (2011). Qualitative and quantitative changes in the essential oil of Laurus nobilis L. leaves as affected by different drying methods. Food Chemistry, 126(2), 691-697.
Semouma, D., Laib, I., Laib, D. E., Chenchouni, H., Rahmani, Y., Fekrache, F., ... & 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.
Sha, L., & Xiong, Y. L. (2020). Plant protein-based alternatives of reconstructed meat: Science, technology, and challenges. Trends in Food Science & Technology, 102, 51–61.

10.1016/J.TIFS.2020.05.022. Siegrist, M., & Hartmann, C. (2019). Impact of sustainability perception on consumption of organic meat and meat substitutes. Appetite, 132(3), 662–673 196–202.56.

Singhal, A., Karaca, A. C., Tyler, R., & Nickerson, M. (2016). Ashish singhal, asli can karaca, robert tyler and mickael nickeron. In Pulse proteins: From processing to structurefunction relationships (pp. 55–78). Grain Legum. pp.. 10.5772/64020.

Solomando, J. C., Antequera, T., Ruiz-Carrascal, J., & Perez-Palacios, T. (2020). Improvement of encapsulation and stability of EPA and DHA from monolayered and multilayered emulsions by high-pressure homogenization. Journal of Food Processing and Preservation, 44(1), e14290.

Soni, M., Maurya, A., Das, S., Prasad, J., Yadav, A., Singh, V. K., ... &Dwivedy, A. K. (2022). Nanoencapsulation strategies for improving nutritional functionality, safety and delivery of plant-based foods: Recent updates and future opportunities. Plant Nano Biology, 1, 100004.

Sridhar, K., Inbaraj, B. S., & Chen, B. H. (2021). Recent advances on nanoparticle based strategies for improving carotenoid stability and biological activity. Antioxidants, 10(5), 713.

Stefanova, G., Girova, T., Gochev, V., Stoyanova, M., Petkova, Z., Stoyanova, A., & Zheljazkov,

V.D. (2020). Comparative study on the chemical composition of laurel (Laurus nobilis L.) leaves from Greece and Georgia and the antibacterial activity of their essential oil. Heliyon, 6(12), e05491.

Sumono, A., & Sd, A.W. (2008). The use of bay leaf (Eugenia polyantha Wight) in dentistry. Dental Journal, 41(3), 147-150.

Sun, A., Wu, W., Soladoye, O. P., Aluko, R. E., Bak, K. H., Fu, Y., et al., (2022). Maillard reaction of food-derived peptides as a potential route to generate meat flavor compounds: A review. Food Research International, 151, Article 110823. 10.1016/J.FOODRES.2021.110823. Sans, P., & Combris, P. (2015). World meat consumption patterns: An overview of the last fifty years (1961–2011). Meat Science, 109, 106–111.

Springmann, M., Clark, M., Mason-D'Croz, D., Wiebe, K., Bodirsky, B. L., Lassaletta, L., et al., (2018). Options for keeping the food system within environmental limits. Nature, 562(7728), 519.

Sun, X., Sarteshnizi, R. A., &Udenigwe, C. C. (2022). Recent advances in protein–polyphenol interactions focusing on structural properties related to antioxidant activities. Current Opinion in Food Science, 45, 100840.

Szczesniak A., M. Bourne.(1969).Évaluation sensorielle de la fermeté des aliments.

Szpicer, A., Onopiuk, A., Barczak, M., & Kurek, M. (2022). The optimization of a gluten-free and soy-free plant-based meat analogue recipe enriched with anthocyanins microcapsules. Lwt, 168, 113849.

TaghianDinani, S., de Jong, S., Vardhanabhuti, B., & van der Goot, A. J. (2024). Improving the quality of gluten-free plant-based meat analogs based on soy protein isolate with insoluble soy fibers and low acyl gellan gum. European Food Research and Technology, 250(2), 389-408.

Tawfek, M. A. E. M., & Ali, A. R. M. (2022). Effectiveness of cardamom (Elettaria cardamomum) or bay leaf (Laurus nobilis L.) powder in improving the quality of Labneh. Acta ScientiarumPolonorumTechnologia Alimentaria, 21(1), 39-52.

Tolve, R., Bianchi, F., Lomuscio, E., Sportiello, L., & Simonato, B. (2022). Current advantages in the application of microencapsulation in functional bread development. Foods, 12(1), 96.

Tolve, R., Galgano, F., Condelli, N., Cela, N., Lucini, L., & Caruso, M. C. (2021). Optimization model of phenolics encapsulation conditions for biofortification in fatty acids of animal food products. Foods, 10(4), 881.

Tometri, S. S., Ahmady, M., Ariaii, P., & Soltani, M. S. (2020). Extraction and encapsulation of Laurus nobilis leaf extract with nano-liposome and its effect on oxidative, microbial, bacterial and sensory properties of minced beef. Journal of Food Measurement and Characterization, 14(6), 3333–3344.

Tometri, SS, Ahmady, M., Ariaii, P. et Soltani, M. (2020). Extraction et encapsulation d'un extrait de feuilles de Laurus nobilis dans des nanoliposomes et son effet sur les propriétés oxydatives, microbiologiques, bactériennes et sensorielles du bœuf haché. Journal of Food Measurement and Characterization, 14 , 3333-3344.

Trofimov, D., Cadar, D., Schmidt-Chanasit, J., Rodrigues de Moraes, P.L., & Rohwer, J.G. (2022). A comparative analysis of complete chloroplast genomes of seven Ocotea species (Lauraceae)

confirms low sequence divergence within the Ocotea complex. Scientific Reports, 12(1), 1-13.
U.S. Plant-Based Market Overview [Internet]. The good food institute; (2018). Available:
Čulina, P., Zorić, Z., Garofulić, I. E., Repajić, M., Dragović-Uzelac, V., &Pedisić, S. (2023).
Optimization of the spray-drying encapsulation of sea buckthorn berry oil. Foods, 12(13), 2448.
Varadan, R., Solomatin, S., Holz-schietinger, C., Cohn, E., Klapholz-brown, A., Shiu, J.W.Y., Fraser, R. (2015). Ground meat replicas. WO2015153666A1.
Vinha, A.F., Guido, L.F., Costa, A.S., Alves, R.C., & Oliveira, M.B.P. (2015). Monomeric and oligomeric flavan-3-ols and antioxidant activity of leaves from different Laurus sp. Food & Function, 6(6), 1944-1949.
Vrljic, M., Solomatin, S., Fraser, R., O'reilly Brown, P., Karr, J., Holz-Schietinger, C., Varadan,
R. (2015). Methods and compositions for consumables. US20150305390A1.
Van der Weele, C., Feindt, P., Van der Goot, A. J., Van Mierlo, B., & Van Boekel, M. (2019). Meat alternatives: An integrative comparison. Trends in Food Science & Technology, 88, 505–512.
Weinrich, R. (2019). Opportunities for the adoption of health-based sustainable dietary patterns: A review on consumer research of meat substitutes. Sustainability, 11, 4028. 10.3390/su11154028.
Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Nishtar, S., & Murray, C. J. L. (2019). Food in the anthropocene: The EAT–lancet commission on healthy diets from sustainable food systems. The Lancet, 393(10170), 447–492. 10.1016/S0140-6736(18)31788-4. Wu, Y. F., Baek, H. H., &
Cadwallader, K. R. (2000). Development of a meat-like process flavoring from soybean-based enzyme-hydrolyzed vegetable protein (E-HVP). Journal of Food Science, 65, 1220–1227.
Xu, Y., Yan, X., Zheng, H., Li, J., Wu, X., Xu, J., ... & Du, C. (2024). The application of encapsulation technology in the food Industry: Classifications, recent Advances, and perspectives. Food Chemistry: X, 21, 101240.
Yasin, G., Anwer, I., Majeed, I., Sabir, M., Mumtaz, S., & Mehmood, A. (2020). Pharmacodynamics of secondary metabolites extracts of some plants from cholistan desert in altering in vitro human hematological indices. International Journal of Pharmaceutical and Phytopharmacological Research, 10(2), 132-147.
Yasin, G., Noor, S., Irshad, S., Haq, I., Fatima, S., Anwer, I., & Khan, A. (2020). Solvents based extraction of antioxidants and their activity from some plants of cholistan desert, Pakistan.International Journal of Pharmaceutical and Phytopharmacological Research, 10(3), 70-76.
Yun, P., Devahastin, S. et Chiewchan, N. (2021). Microstructures des substances encapsulées et leurs relations avec l'efficacité d'encapsulation et la libération contrôlée des constituants bioactifs : une revue. Comprehensive reviews in food science and food safety .
Yun, P., Devahastin, S., &Chiewchan, N. (2021). Microstructures of encapsulates and their relations with encapsulation efficiency and controlled release of bioactive constituents: A review. Comprehensive reviews in food science and food safety, 20(2), 1768-1799.
Zabot, G. L., Schaefer Rodrigues, F., Polano Ody, L., Vinícius Tres, M., Herrera, E., Palacin, H.,
... & Olivera-Montenegro, L. (2022). Encapsulation of bioactive compounds for food and agricultural applications. Polymers, 14(19), 4194.
Zahari, I., Ferawati, F., Helstad, A., Ahlström, C., Östbring, K., Rayner, M., et al., (2020). Development of high-moisture meat analogues with hemp and soy protein using extrusion cooking. Foods, 9(6), 772 2020, 9, Page 772. 10.3390/FOODS9060772.
Zapadka, K. L., Becher, F. J., Dos Santos, A. G., & Jackson, S. E. (2017). Factors affecting the physical stability (aggregation) of peptide therapeutics. Interface focus, 7(6), 20170030.
Zerrouki, K., & Riazi, A. (2021). Antimicrobial activity of phenolic extracts of Juniperus phoenicea and Glycyrrhiza glabra from Western Algeria. International Journal of Pharmaceutical and Phytopharmacological Research (5), 18-24.
Zhang, C., Guan, X., Yu, S., Zhou, J., & Chen, J. (2022). Production of meat alternatives using live cells, cultures and plant proteins. Current Opinion in Food Science, 43, 43–52. 10.1016/J.COFS.2021.11.002. Aiking, H., & de Boer, J. (2018). Protein and sustainability–thepotential of insects. Journal of Insects as Food and Feed, 1–6.
Arntfield, S. D., & Yada, R. Y. (2018). Proteins from oil-producing plants. Proteins in food processing (2nd ed.). Duxford, UK: Woodhead Publishing pp. 187–221.
Zibi, R.D.N., Tala, V.R.S., Yamen, P., Mbopi, N.H.B., Tcheuffa, G.M.N., & Ngoupayo, J. (2022).

Comparative antiplasmodial and cytotoxic activities of Coffea arabica and Coffea canephora alkaloids extracts. International Journal of Pharmaceutical and Phytopharmacological Research, 12(1), 54-59.

Zolfaghari, B., Samsam-Shariat, S.H., & Ghannadi, A. (2013). Chemical composition ofvolatile oils from the endocarp and hulls of persian bay laurel fruit: A fragrant herb used in traditional Iranian medicine. Journal of Reports in Pharmaceutical Sciences, 2, 1-4.

Annexes

Annexes

FICHE DE TEST HÉDONIQUE – VIANDE HACHÉE VÉGÉTALE SANS GLUTEN

Nom :

Prénom :

Date :

Consommez-vous habituellement des viandes végétales ? Non

Instructions

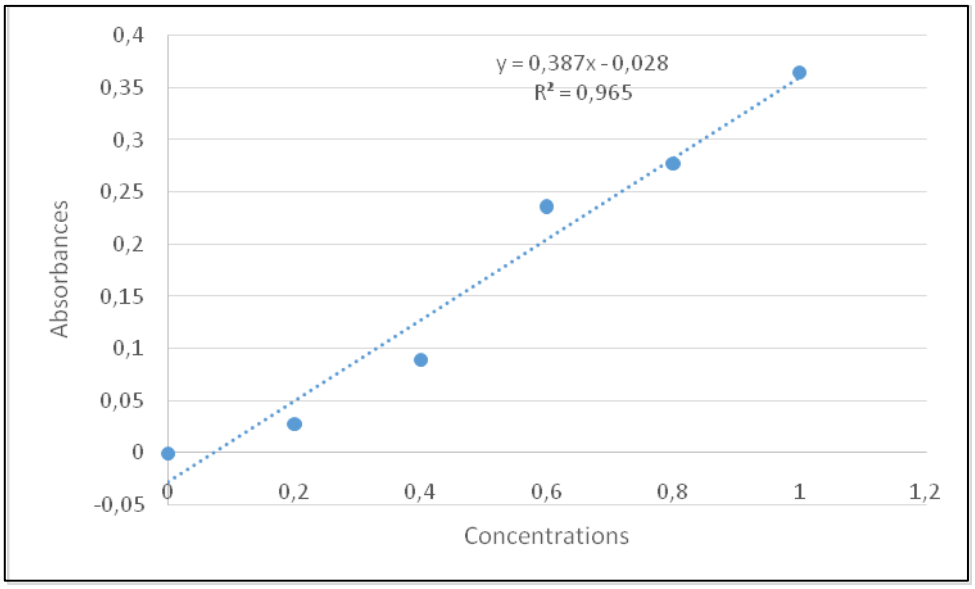
Veuillez examiner et déguster attentivement chaque échantillon de viande hachée végétale sans gluten. Attribuez une note de 1 à 9 selon votre niveau d'appréciation.

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

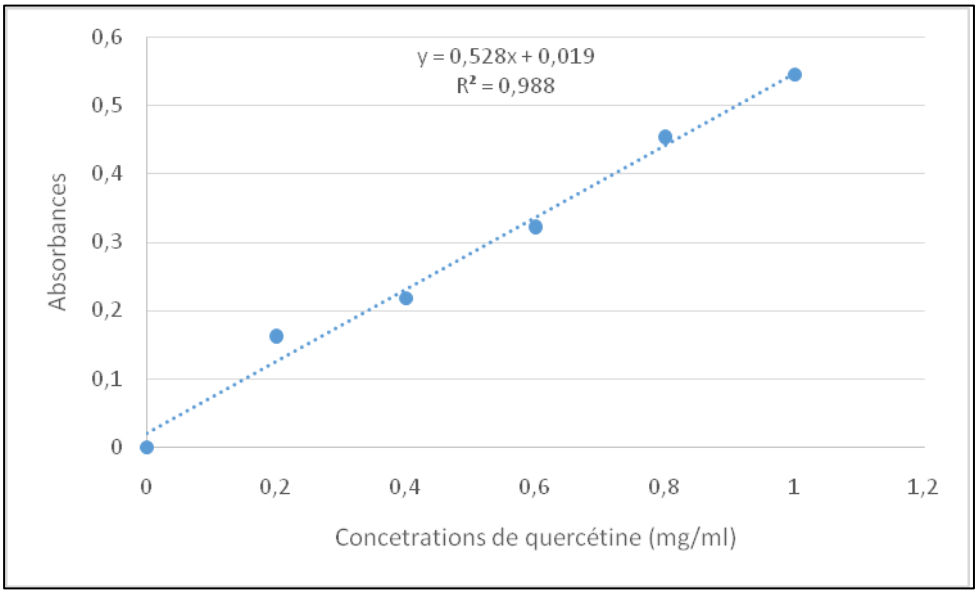
Série (Extrait libre / Extrait encapsulé dans des cellules intact / Extrait encapsulé dans des cellules plasmolyseé)

Attribut sensoriel	A (0,02%)	B (0,03%)	C (0,05%)	Témoin
Odeur (typicité, intensité)				
Fermeté				
Jutosité				
Granulosité (type viande hachée)				
Masticabilité				
Cohésion (tenue des particules)				
Gout global				
Arrière-gout (végétal, amer, persistant)				
Acceptabilité globale				

Figure. Fiche de test hédonique appliquée à l'evaluation sensorielle de la viande hachée végltale sans gluten, préparé selon plusieurs série expérimentale (Extrait libre / Extrait encapsulé dans des cellules intact / Extrait encapsulé dans des cellules plasmolyseé) et divers niveaux de concentration (temoin/0,02%/0,03%/0,05%).



Courbe d'étalonnage des polyphénols totaux : variation de l'absorbance en fonction de la concentration (exprimée en équivalents acide gallique).



Courbe d'étalonnage des flavonoïdes totaux : évolution de l'absorbance en fonction de la concentration (exprimé en équivalent quercitrine).

الجمـــهورية الجزائـــرية 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 العلـوم
قسم علوم الفلاحة
رقم : / ق ع ف / 2026

Skikda le : 07/07/2026

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة
قسم العلوم الفلاحية
كلية العلوم

Je soussigné(e) : Mme. Djeffal samia Président(e) de Jury

Certifie que L'étudiant(e) : Beggour bouchra

Spécialité : Agroalimentaire et qualité des produits

Intitulé : valorisation d'extrait de laurier (laurus nobilis) encapsulés dans des viandes végétales sans gluten : approche technologique et fonctionnelle

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.

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

Scanné avec CamScanner

الجمـــهوريـة الجزائـــرية 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 العلـوم
قسم علوم الفلاحة
رقم : / ق ع ف / 2026

Skikda le : 07/07/2026

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

Je soussigné(e) : Mme. Djeffal samia Président(e) de Jury

Certifie que L'étudiant(e) : Bensadoun chaima

Spécialité : Agroalimentaire et qualité des produits

Intitulé : valorisation d'extrait de laurier (laurus nobilis) encapsulés dans des viandes végétales sans gluten : approche technologique et fonctionnelle

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.

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

Scanned with CamScanner

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. Djeffal samia Président(e) de Jury

Certifie que L'étudiant(e) : Bendjama salsabil

Spécialité : Agroalimentaire et qualité des produits

Intitulé : valorisation d'extrait de laurier (laurus nobilis) encapsulés dans des viandes végétales sans gluten : approche technologique et fonctionnelle

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.

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

Scanné avec CamScanner