الجمـــهوريـة الجزائـــريـة الديمقراطية الـشعبيـــة.
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement
Supérieur etde la Recherche Scientifique
Université 20 Août 1955 - SKIKDA -
Faculté des Sciences كلية العلـوم
Dpartement D' Agronomie قسم علوم الفلاحة
Réf : / D S AGRO/20262026 / ق ع ف /

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
أوت 1955- سكيكدة

Skikda le : .....

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

Je soussigné(e) : **DJEFFAL Samia.** Président(e) de Jury

Certifie que L'étudiant(e) : BLIDA Wiam

Spécialité : **Agroalimentaire et qualité des produits**

Intitulé : **Valorisation technologique de la poudre de châtaigne par fermentation lactique en vue de son incorporation dans la formulation des biscuits fonctionnels.**

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.

Directeur de mémoire	Président(e) de Jury

الجمـــهوريـة الجزائـــريـة الديمقراطية الشعبيـــة.
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement
Supérieur etde la Recherche Scientifique
Université 20 Août 1955 - SKIKDA -
Faculté des Sciences كلية العلـوم
Dpartement D' Agronomie قسم علوم الفلاحة
Réf : / D S AGRO/20262026 / ق ع ف /

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
أوت 1955- سكيكدة

Skikda le : .....

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

Je soussigné(e) : **DJEFFAL Samia.** Président(e) de Jury

Certifie que L'étudiant(e) : BOUBAKOUR Aya

Spécialité : **Agroalimentaire et qualité des produits**

Intitulé : **Valorisation technologique de la poudre de châtaigne par fermentation lactique En vue de son incorporation dans la formulation Des biscuits fonctionnels.**

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.

Directeur de mémoire	Président(e) de Jury

الجمـــهوريـة الجزائـــريـة الديمقراطية الـشعبيـــة.

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement
Supérieur etde la Recherche Scientifique
Université 20 Août 1955 - SKIKDA -
Faculté des Sciences كلية العلـوم
Dpartement D' Agronomie قسم علوم الفلاحة
Réf : / D S AGRO/20262026 / ق ع ف /

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
أوت 1955- سكيكدة

Skikda le : .....

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

Je soussigné(e) : **DJEFFAL Samia.** Président(e) de Jury

Certifie que L'étudiant(e) : GATI Amani

Spécialité : **Agroalimentaire et qualité des produits**

Intitulé : **Valorisation technologique de la poudre de châtaigne par fermentation lactique en vue de son incorporation dans la formulation des biscuits fonctionnels.**

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.

Directeur de mémoire	Président(e) de Jury

الجمـــهوريـة الجزائـــريـة الديمقراطية الشعبيـــة.

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement
Supérieur etde la Recherche Scientifique
Université 20 Août 1955 - SKIKDA -
Faculté des Sciences كلية العلـوم
Dpartement D' Agronomie قسم علوم الفلاحة
Réf : / D S AGRO/20262026 / ق ع ف /

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
أوت 1955- سكيكدة

Skikda le : .....

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

Je soussigné(e) : **DJEFFAL Samia.** Président(e) de Jury

Certifie que L'étudiant(e) : KAOUANE Khouloud

Spécialité : **Agroalimentaire et qualité des produits**

Intitulé : **Valorisation technologique de la poudre de châtaigne par fermentation lactique en vue de son incorporation dans la formulation des biscuits fonctionnels.**

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.

Directeur de mémoire	Président(e) de Jury

République Algérienne Démocratique & Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université 20 août 1955- Skikda

Faculté des Sciences
Département d'Agronomie

Mémoire De fin d'étude en vue de l'obtention

Diplôme de Master en Science Alimentaire

Spécialité : Agro-Alimentaire Et Qualité des produits

Thème :

VALORISATION TECHNOLOGIQUE DE LA POUDRE DE CHÂTAIGNE PAR FERMENTATION LACTIQUE

En vue de son incorporation dans la formulation Des biscuits fonctionnels

Présenté par :

Melle Blida Wiam

Melle Boubakour Aya

Melle Gati Amani

Melle Kaouane Khouloud

Devant le jury composé de :

Mme DJEFFAL.S	**Présidente**	**Professeur**	**Université 20 Aout1955 Skikda**
Mme LAIB.I	**Examinatrice**	**MCA**	**Université 20 Aout1955 Skikda**
Mme LEULMI.I	**Encadrant**	**MAA**	**Université 20 Aout1955 Skikda**

Année universitaire: 2025 / 2026



Remerciements

Avant toute chose, nous remercions Dieu le Tout-Puissant et le Miséricordieux, qui a éclairé notre chemin et facilité la réalisation de ce travail à chaque étape. Nous le remercions de nous avoir accordé la santé, la persévérance et la force nécessaires pour surmonter les obstacles et mener à bien ce projet qui couronne notre parcours universitaire.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à notre directrice de recherche, ***Mme Leulmi Imene,*** *pour avoir accepté de diriger ce travail, ainsi que pour ses précieux conseils et sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce mémoire.*

Nous tenons également à exprimer notre gratitude aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre travail et d'assister à notre soutenance.

Nous tenons également à remercier chaleureusement l'ensemble des enseignants de la spécialité pour la qualité de leur enseignement, leur dévouement et leur soutien tout au long de notre formation. Leurs connaissances et leur encadrement ont largement contribué à notre développement académique et scientifique.

Nous remercions également les ingénieurs du laboratoire du département des sciences agronomiques, ainsi que l'administration, pour leur soutien et les facilités administratives qu'ils nous ont accordées, ce qui nous a permis de mener à bien ce travail dans les meilleures conditions.

Nous tenons également à remercier la directrice de la direction du commerce et de la répression des fraudes, ainsi que l'ensemble du personnel du laboratoire. Nous les remercions chaleureusement pour leur accueil, leur accompagnement et leur aide précieuse lors de la réalisation d'une partie de nos analyses, ce qui a contribué à enrichir et à compléter nos résultats.

Dédicace

*Je remercie tout d'abord **Allah** le Tout-Puissant pour Sa bienveillance, Sa miséricorde.*

Je dédie humblement ce travail

***À mes chers parents,** qui ont été mes piliers, mon inspiration et ma motivation tout au long de ce parcours. À mon père, pour son soutien inébranlable, et à ma mère, pour sa lumière, son amour inconditionnel et sa patience infinie. Que Dieu les protège et les bénisse.*

*À **Mme Leulmi Imene**, mon encadrant, dont les conseils avisés, les orientations précieuses et le soutien constant ont été d'une aide inestimable dans l'élaboration de ce mémoire.*

*À **mon frère et mes sœurs**, Amine, Imane, Djihen, Hiba, qui ont été mes complices, mes confidents et mes meilleurs supporters. Votre présence a été un réconfort constant.*

***À ma famille élargie**, à mes Beaux frères Charaf et Zine Eddin, dont le soutien et les encouragements ont été une source de force et de courage.*

***À mes amis(es),** Takoua, Wissal, Rania, Hiba, qui ont partagé mes joies, mes peines et mes succès. Votre amitié est un trésor que je chérirai toujours.*

***À mon Binôme**, Aya, Wiam, Amani, avec qui j'ai partagé ce voyage académique. Merci pour notre collaboration fructueuse et notre soutien mutuel.*

***À ma charmante nièce Ranime,** la petite princesse, à qui je souhaite un avenir aussi radieux que son sourire*

***À toute la section** Science Alimentaire, pour l'esprit d'entraide et de solidarité qui nous a unis.*

KHOULOUD





بسم الله الرحمن الرحيم

الحمد لله والشكر لله أولًا ودائماً، الذي أنعم عليّ بنعمة العلم والصحة والقدرة، وأعانني بفضله وكرمه على إتمام هذا العمل المتواضع وتخطي كل الصعاب

إلى النبع الذي لا ينتهي من العطاء، إلى من حصدتُ اليوم ثمار دعواتهما وسهرهما

إلى أمي الغالية، نوري في هذه الحياة، ومنبع الحنان، التي كانت دعواتها الصامتة سنداً لي في كل خطوة، وتحملت معي كل لحظات التعب والقلق لتسعد بنجاحي

إلى أبي العزيز، قدوتي ومثلي الأعلى، من علم الصبر وكافح لتعبيد طريق العلم أمامي، ومنحني القوة لأقف بكل فخراليوم امامكم

إلى سندي وعزوتي في هذه الدنيا، إخوتي الأحباء

أحمد ومحمد، من تقاسمت معهم الأيام وكانوا لي خيراً ومستنداً في كل حين

إلى زهرات حياتي ورفيقات دربي، أخواتي الغاليات

هاجر، زينب، وشيماء، مصدر البهجة والدعم المستمر، أدامكم الله لي سنداً وفرحة لا تغيب

فتيحة"إلى عمتي الغالية

عبارات الشكر والامتنان تقف عاجزة أمام كل ما قدمتِه لي؛ شكراً لكِ من أعماق قلبي على مساندتكِ الدائمة، ووقفاتكِ الطيبة التي كانت عوناً كبيراً لي في إتمام هذا المشوارلي

الي عمتي الغالية نجاة

إلى عمتي الغالية "نجاة": بركة منزلنا ونور أيامنا، شكراً لوجودكِ الدافئ وقلبكِ النقي الذي يملأ البيت صفاءً وفرحاً، حفظكِ الله لنا ورعاكِ.

، التي لم تبخل علينا بعلمها، نصحها، وصبرها طوال فترة إنجاز هذا البحث، فلكِ مني كل التقدير "لعلمي إيمان"أستاذتي المشرفة الفاضلة والاحترام

إلى من شاركوني رحلة البحث والجهد والتعب، شريكاتي في هذه المذكرة

صديقاتي العزيزات وئام، أماني، وخلود، شكراً لكنّ على روح التعاون والمثابرة، فكنتنّ خير رفيقات في هذا العمل العلمي

إلى عصافير الجنة وبهجة قلبي، أولاد أخواتي الغاليين

رؤية، ماريا، حفصة، نسرين، مريم، عبد العالي، عثمان، ياسر، وعمران، أدامكم الله فرحة تزين أيامنا

إلى رفيقات الغرفة وبنات الإقامة الجامعية اللواتي جعلن الأيام الصعبة تمرّ كالنسمة

شكراً لكنّ على الذكريات الجميلة، . وإلى جميع صديقاتي الغاليات دون استثناء... مروة، صفاء، آية، إكرام، وشهرزاد.صديقاتي العزيزات الضحكات المشتركة، والدعم المتبادل في أوقات الدراسة والامتحانات

أهديكم جميعاً ثمرة جهدي المتواضع

Aya



Dédicace

*Je remercie tout d'abord **Allah** le Tout-Puissant pour Sa bienveillance, Sa miséricorde et Son soutien tout au long de la préparation de ce mémoire. C'est grâce à lui que j'ai pu mener ce travail à son terme.*

Du fond du cœur, je dédie ce modeste travail :

*À mes très **chers parents**, pour leur amour inconditionnel, leurs encouragements et leurs précieux conseils qui m'ont aidée à surmonter les moments difficiles et à persévérer jusqu'à l'achèvement de ce travail. Que Dieu vous garde et vous comble de bonheur.*

*À mes **grands-parents**, pour leurs bénédictions sincères et leurs vœux de réussite qui m'ont accompagnée à chaque étape de mon parcours.*

*À ma chère sœur **Nour El Houda** et à mon cher frère **Wassim**, pour leur soutien et leur affection.*

*À notre encadrante **Mme. Leulmi Imene**, pour sa disponibilité, ses précieux conseils et son accompagnement tout au long de la réalisation de ce mémoire.*

*À mes chères binômes **Khouloud** ,**Aya** et **Wiâm**, avec qui j'ai partagé les efforts, les moments de doute et les joies de ce parcours. Merci pour votre soutien et votre bonne humeur.*

À tous ceux qui m'ont soutenue, de près ou de loin.



Amani

Dédicaces

Je remercie avant tout ***Allah*** *le Tout-Puissant qui m'a donné la force, la patience*
Et le courage nécessaire pour accomplir ce travail.
Je dédie ce mémoire, fruit de plusieurs années d'efforts, de sacrifices et de persévérance, aux personnes
les plus chères à mon cœur.

À mes très chers parents,
pour leur amour, leurs sacrifices, leur soutien et tous les efforts qu'ils ont fournis pour me voir réussir.
À la femme qui a souffert sans jamais me laisser souffrir,
qui a toujours été présente à mes côtés,
qui a fait tout son possible pour me voir heureuse et réussir,
à celle dont l'amour m'accompagne depuis toujours,

À ma très chère mère, Malika,
merci pour ton amour, tes sacrifices, tes prières et ton soutien sans limite.
À l'homme qui a travaillé sans relâche pour nous offrir le meilleur,
qui m'a soutenue à chaque étape,
qui m'a appris la patience, le courage et la persévérance,

À mon cher père, Mohamed,
merci pour tous tes sacrifices, tes conseils et ton soutien.

À mes chères sœurs *: Badra El Boudour, Hadjer, Khaoula et Safi,*
pour leur amour, leurs encouragements et leur présence.
À leurs époux, pour leur soutien et leur bienveillance.

À mes adorables neveux et nièces *: Oulfa , Ghallia ,Taim , Mariem, Sirine, Rassim et Sidra*
qui apportent joie et bonheur à notre famille.

À mon encadreur Mme Leulmi Imane
Mes sincères remerciements pour son aide, ses conseils avisés, sa patience et son soutien durant toute la préparation de ce mémoire.

À mes collègues *Aya, Khouloud et Amani*
avec qui j'ai partagé cette belle aventure.

À mes amies de chambre à la cité,
pour tous les moments passés ensemble, le soutien et les souvenirs partagés , Amal , Manel , Fatma

À toute ma famille*, proche ou éloignée,*
merci pour votre soutien, vos encouragements et votre présence.

À vous tous*, je dis merci du fond du cœur.*
Cette réussite est aussi la vôtre.

Wiam

SOMMAIRE

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste de tableau

1. Introduction.....Error! Bookmark not defined.

Synthèse bibliographique

1.Chapitre 1. Généralités sur le châtaignier (*Castanea sativa* Mill.) Error! Bookmark not defined.

1.1. Classification botanique.....**4**Error! Bookmark not defined.

1.2. Répartition géographique..... **Error! Bookmark not defined.**

1.2.1. Dans le monde ..... **Error! Bookmark not defined.**

1.2.2. En Algérie..... **Error! Bookmark not defined.**

1.3. Composition chimique de la châtaigne..... **Error! Bookmark not defined.**

1.4. Intérêts nutritionnels.....8

1.5. Contraintes technologiques (sans gluten, richesse en amidon)..... **Error! Bookmark not defined.**

1.5.1. Absence de gluten.....9

1.5.2. Teneur élevée en amidon.....9

1.6. Utilisation de la châtaigne 10

1.7. Conservation de la châtaigne 11

2.Chapitre 2. Fermentation lactique des matrices végétales et rôle de *Lactobacillus plantarum* 12

2.1. Rôle de la fermentation dans l'alimentation 12

2.2. Généralités sur Lactobacillus plantarum 12

2.3. Rôle de Lactoplantibacillus plantarum 13

2.4. Effets de la fermentation *Lactobacillus plantarum*.....14

2.4.1. Effet sur le pH.....14

2.4.2. Effet sur la biodisponibilité des minéraux.....14

2.4.3. Sur les composés phénoliques 15

3.Chapitre 3. Biscuiterie et farines alternatives 16

3.1. Technologie du biscuit 16

3.1.1. Histoire d'apparition du biscuit 16

3.1.2. Définition des biscuits.....16

3.1.3. Technologie des biscuits 16
3.1.4. Etapes de fabrication des biscuits 17
3.2. Effets des substitutions partielles 19
3.3. Définition d'un aliment fonctionnel 19
3.4. Tendances produits fonctionnels 21

Matériels et Méthode

1. Nature et origine de la matière première 22

1.1. Matériel végétal 22
1.2. Microorganisme de fermentation 22
1.3. Ingrédients de formulation des biscuits 23

2. Préparation de la farine de châtaigne 23

3. Préparation du substrat fermentescible et conduite de la fermentation 24

3.1. Préparation de l'inoculum bactérien 24
3.2. Conduite de la fermentation 24
3.3. Traitement post-fermentation 25

4. Détermination de la composition biochimique des farines de châtaigne fermentée et non fermentée 26

4.1. Détermination du pH 25
4.2. Acidité titrable 26
4.3. Détermination de la teneur en eau 27
4.4. Détermination de la teneur en cendres 27
4.5. Détermination de la teneur en fibres brutes 28
4.6. Détermination de la teneur en protéines 29
4.7. Détermination de la teneur en matières grasses 31
4.8. Détermination des sucres totaux (ST) 31
4.9. Détermination de la teneur en sucres réducteur 32

5. Détermination des propriétés techno fonctionnelles 33

5.1. Détermination de la capacité de rétention d'eau 33
5.2. Capacité de rétention d'huile 34
5.3. Capacité de gonflement 34
5.4. Capacité émulsifiante 35

6. Détermination des propriétés antioxydantes 35

6.1. Extraction 35
6.2. Dosage des polyphénols totaux 36
6.3. Dosage des flavonoïdes totaux 36
6.4. Détermination de l'activité antioxydante par le test DPPH 37

7. Préparation des Biscuits sans gluten 38

7.1. Formulations expérimentales 38
7.2. Procédé de fabrication des biscuits 39

8. Analyse sensorielle du biscuit 39

8.1. Constitution du jury de dégustation 40
8.2. Conditions expérimentales 40

9. Évaluation de la qualité des biscuits sans gluten 41

9.1. Volume spécifique 41
9.2. Facteur d'expansion 41
9.3. Teneur en humidité 42
9.4. Analyse de la couleur 42

10. Analyse statistique 42

Résultat et discussion

1.Caractéristiques physicochimiques des farines des châtaigne fermentée et non fermentée 44

1.1. Détermination du pH 44
1.2. Acidité Titrable 45
1.3. Humidité (teneur en eau) 46
1.4. Teneur en Cendres 47
1.5. Teneur de fibre brute 48
1.6. Teneur en matiére grasse 49
1.7. Teneur en protéines 50
1.8. Teneur en sucres totaux 51
1.9. Teneur en sucres réducteurs 52

2.Propriétés techno-fonctionnelles des farines de châtaigne fermentée et non fermentée 53

2.1. Capacité de rétention d'eau 53
2.2. Capacité de Rétention d'Huile (CRH) 54
2.3. Capacité de Gonflement (CG) 55
2.3. Pouvoir émulsifiant 55

3. Composés phénoliques et propriétés antioxydants des farines 56

3.1. Polyphénols Totaux 57
3.2. Teneur en Flavonoïdes Totaux 58
3.3. Pourcentage de piégeage DPPH 58

4. Résultats de l'analyse sensorielle des cookies (Test hédonique) 59

4.1. Couleur et aspect visuelle 60
4.2. Arôme et Profil Volatil 60
4.3. Goût et Saveur.....61
4.4. Texture en Bouche 61
4.5. Acceptabilité Globale et Intention d'Achat.....61
4.6. Conclusion résultats analyse sensorielle.....62

5. Caractéristiques des biscuits sans gluten enrichis en farines de châtaigne fermentée non fermentée 62

5.1. Propriétés physiques biscuits 62
5.1.1. Teneur en humidité finale des biscuits.....62
5.1.2. Volume spécifique (Vsp) 63
5.1.3. Facteur d'expansion.....64
5.2. Analyse de la couleur des biscuits formulés 65

Conclusion 67

Références bibliographiques 69

Liste des abréviations

AACC : American Association of Cereal Chemists
AFNOR : Association française de normalisation
ANOVA : Analyse de variance
ANSES : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
AOAC : *Association of Official Analytical Chemists*
a* : Indice de rouge (paramètre colorimétrique CIELab)
b* : Indice de jaune (paramètre colorimétrique CIELab)
CE : Capacité émulsifiante
CG : Capacité de gonflement
CIELab : Commission Internationale de l'Éclairage — espace colorimétrique Lab
CRE : Capacité de rétention d'eau
CRH : Capacité de rétention d'huile
D/E : Rapport diamètre/épaisseur (facteur d'expansion)
DNS : Acide 3,5-dinitrosalicylique
DPPH : 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl
EAG : Équivalents acide gallique
EDTA : Acide éthylène diamine tétraacétique
EQ : Équivalents quercétine
F : Farine fermentée
F30 / F50 / F80 : Formulation enrichie en farine de châtaigne fermentée à 30 / 50 / 80 %
FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (Food Agriculture organization of the United Nations)
FCF : Farine de châtaigne fermentée
FCNF : Farine de châtaigne non fermentée
FF : Farine fermentée

FNF : Farine non fermentée
HMF : Hydroxyméthylfurfural
ISO : Organisation internationale de normalisation
L* : Clarté (paramètre colorimétrique CIELab)
LAB : Lactic Acid Bacteria (bactéries lactiques)
LDL : Low-Density Lipoprotein (lipoprotéine de basse densité)
MS : Matière sèche
NF30 / NF50 / NF80 : Formulation enrichie en farine de châtaigne non fermentée à 30 /50 / 80 %
NF (norme) : Norme française
PI : Pourcentage d'inhibition
PP : Pourcentage de piégeage
PPT : Polyphénols totaux
T0 : Formulation témoin (sans farine de châtaigne)
NF50 : Formulation avec 50 % de farine de châtaigne non fermentée
F50 : Formulation avec 50 % de farine de châtaigne fermentée
UFC/g : Unités formant colonies par gramme

Vsp : Volume spécifique
WHO : Organisation mondiale de la santé (world Health Organisation)

Liste des figures

Figure 1: Photographie d'arbre du châtaignier (Castanea Sativa Mill). 4
Figure 2: Distribution du Castanea Sativa Mill dans son aire géographique méditerranéenne (Conedera *et al*., 2016). 5

Liste de tableau

Tableau 01 : Composition nutritionnelle et minérale de la farine de châtaigne (pour 100 g) (Source : ANSES, Table Ciqual, 2025) 8

Résumé

Cette étude évalue l'effet de la fermentation lactique par *lactobacillus plantarum* (*Lactiplantibacillus plantarum*) sur les propriétés physicochimiques, techno-fonctionnelles et antioxydantes de la farine de châtaigne (*Castanea sativa* Mill.) et sur la qualité des biscuits sans gluten élaborés à partir de cette farine. Les résultats physicochimiques montrent une diminution significative du pH de 6,43 à 4,87 et une augmentation de l'acidité titrable de 0,70 à 1,40 %. La teneur en protéines a augmenté de 5,63 à 7,24 %,et les sucres réducteurs et les sucres totaux ont progressé de manière notable. En revanche, les teneurs en matières grasses, fibres et cendres ont diminué après fermentation. L'évaluation des propriétés techno-fonctionnelles révèle une amélioration significative de la capacité de rétention d'eau (1,66 à 2,62 g/g) et en huile (1,01 à 1,44 g/g), tandis que la capacité de gonflement est restée stable et le pouvoir émulsifiant a diminué de 16,57 à 8,96%. Sur le plan antioxydant, Les polyphénols totaux ont augmenté de 945 à 1421 mg EAG/100 g MS, alors que les flavonoïdes totaux sont passés de 391,42 à 681,34 mg EQ/100 g MS, et l'activité antiradicalaire DPPH de 88,79 à 90,36 %.

Concernant la qualité des biscuits, la formulation F50 incorporant 50% de farine fermentée présente les meilleures caractéristiques sensorielles, physiques et colorimétriques, avec une couleur brun doré attractive et un facteur d'expansion supérieur à celui du témoin. L'analyse sensorielle confirme que cette formulation est la plus appréciée par les dégustateurs.

En conclusion, la fermentation lactique par *Lactobacillus plantarum* améliore certains paramètres (nutritionnelle, fonctionnelles et l'activité antioxydante) de la farine de châtaigne. Elle contribue également à l'amélioration des caractéristiques physiques, technologiques et sensorielles des biscuits sans gluten. La formulation F50 s'est révélée être la plus performante et la plus appréciée par les dégustateurs.

Mots-clés : Farine de châtaigne, *Lactobacillus plantarum* (*Lactiplantibacillus plantarum*), fermentation lactique, biscuits sans gluten, activité antioxydante, propriétés techno-fonctionnelles, analyse sensorielle.

Abstract

This study evaluates the effect of lactic fermentation using Lactobacillus *plantarum* (*Lactobacillus plantarum)* on the physicochemical, techno-functional, and antioxidant properties of chestnut flour (*Castanea sativa* Mill.) and on the quality of gluten-free biscuits made from this flour.

The physicochemical results show a significant decrease in pH from 6.43 to 4.87 and an increase in titratable acidity from 0.70 to 1.40%. The protein content increased from 5.63 to 7.24%, whilst reducing sugars and total sugars significantly. In contrast, fat, fiber, and ash contents decreased following.

An assessment of techno-functional properties revealed a significant improvement in water-holding capacity (from 1.66 to 2.62 g/g) and oil-holding capacity (from 1.01 to 1.44 g/g), while swelling capacity remained stable, and emulsifying capacity decreased from 16.57 to 8.96%. In terms of antioxidant activity. Total phenolic compounds increased from 945 to 1421 mg GAE/100 g DM, whereas total flavonoids increased from 391.42 to 681.34 mg QE/100 g DM. And DPPH free radical scavenging activity increased from 88.79% to 90.36%.

With regard to biscuit quality, formulation F50, incorporation 50% fermented chestnut flour, exhibited the best sensory, physical and colorimetric characteristics, with an attractive golden-brown colour and a higher expansion factor than the control. Sensory analysis confirms that this formulation is the most highly rated by tasters.

In conclusion, lactic fermentation using *Lactobacillus plantarum* improves certain parameters (nutritional, functional and antioxidant activity) of chestnut flour. It also contributes to improving the physical, technological, and sensory characteristics of gluten-free biscuits. The F50 formulation proved to be the most effective and the most highly by tasters.

Keywords: Chestnut flour, *Lactobacillus plantarum (lactiplantibacillus plantarum)*, lactic fermentation, gluten-free biscuits, antioxidant activity, techno-functional properties, sensory analysis.

الملخص

تقيم هذه الدراسة تأثير التخمير اللبني بواسطة بكتيريا *Lactobacillus plantarum* على الخصائص الفيزيائية والكيميائية والوظيفية والتكنولوجية والمضادة للأكسدة لدقيق الكستناء (*Castanea sativa* Mill.)، وعلى جودة البسكويت الخالي من الغلوتين المصنوع من هذا الدقيق.

تظهر النتائج الفيزيائية والكيميائية انخفاضًا ملحوظًا في درجة الأس الهيدروجيني من 6.43 إلى 4.87، وزيادة في الحموضة القابلة للمعايرة من 0.70 إلى 1.40٪. وارتفع محتوى البروتينات من 5.63 إلى 7.24٪، كما ارتفعت نسبة السكريات المختزلة والسكريات الكلية بشكل ملحوظ. في المقابل، انخفضت نسبة الدهون والألياف والرماد بعد التخمير.

يكشف تقييم الخصائص الوظيفية والتكنولوجية تحسنًا ملحوظًا في قدرة الاحتفاظ بالماء (من 1.66 إلى 2.62 غ/غ) والزيت (من 1.01 إلى 1.44 غ/غ)، في حين بقيت قدرة الانتفاخ مستقرة وانخفضت القدرة الاستحلابية من 16.57 إلى 8.96٪.

و من الناحية الضادة للأكسدة،ارتفع محتوى البوليفينولات الكلية من 945 إلى 1421 ملغ مكافئ حمض الغاليك/100غ مادة جافة، في حين ارتفع محتوى الفلافونويدات الكلية من 391.42 إلى 681.34 ملغ مكافئ الكيرسيتين/100غ مادة جافة. وارتفع النشاط المضاد للجذور الحرة DPPHمن 88.79٪ إلى 90.36٪.

وأظهرت نتائج التحليل الحسي أن التركيبة المحتوية على 50٪ من دقيق الكستناء المخمر (F50) حققت أفضل الخصائص الحسية، حيث سجلت 8.22 للرائحة، و8.46 للمذاق، و7.78 للقوام، و8.54 للتقبل العام، و8.39 لنية الشراء. في المقابل، سجلت عينة الشاهد أدنى القيم بالنسبة لمعظم الصفات الحسية.

وفيما يتعلق بالخصائص الفيزيائية، أظهرت البسكويتات المحضرة باستعمال 50٪ من دقيق الكستناء المخمر محتوى رطوبة نهائيًا أقل (6.12٪) مقارنة بالشاهد (7.24٪)، وحجمًا نوعيًا أعلى (2.41 سم³/غ مقابل 2.33 سم³/غ)، إضافة إلى معامل انتشار أكبر (9.31 مقابل 7.82). كما بين التحليل اللوني أن التخمير ساهم في الحصول على لون بني ذهبي أكثر جاذبية مقارنة بالبسكويت المدعم بدقيق الكستناء غير المخمر.

وختاما، فإن التخمير البني بواسطة *Lactobacillus plantarum*يحسن بعض المعايير (التغذوية،الوظيفية و النشاط المضاد للأكسدة) لدقيق الكستناء. كما يساهم في تحسين الخصائص الفيزيائية والتكنولوجية والحسية للبسكويت الخالي من الغلوتين. وقد تبين أن التركيبة F50 هي الأفضل أداءً والأكثر تفضيلًا لدى المتذوقين.

الكلمات المفتاحية: دقيق الكستناء، *Lactobacillus plantarum* (*Lactiplantibacillus plantarum*)، التخمير اللبني، البسكويت الخالي من الغلوتين، النشاط المضاد للأكسدة، الخصائص الوظيفية والتكنولوجية، التحليل الحسي.

1. Introduction

La châtaigne (*Castanea sativa* Mill.), fruit du châtaignier appartenant à la famille des Fagaceae, constitue depuis l'Antiquité une ressource alimentaire d'importance majeure dans plusieurs régions du monde. En raison de sa valeur énergétique élevée, elle était autrefois désignée sous le nom d'« arbre à pain » et représentait une source essentielle de glucides pour les populations rurales (Mete *et al.*, 2017).

Sur le plan nutritionnel, la châtaigne fraîche se distingue par une teneur élevée en eau et en amidon, représentant respectivement près de 40 à 45 % de sa composition, tandis que ses teneurs en protéines et en lipides demeurent relativement faibles (Subaşı, 2004). Elle constitue également une source appréciable de minéraux essentiels, notamment le potassium, le phosphore et le magnésium, ainsi que de vitamines telles que les vitamines B1, B2 et C. Grâce à cette richesse nutritionnelle et à son absence naturelle de gluten, la farine de châtaigne suscite un intérêt croissant dans le développement de produits alimentaires fonctionnels et de formulations destinées aux personnes atteintes de la maladie cœliaque ou présentant une intolérance au gluten (Sacchetti *et al.*, 2004).

Actuellement, la farine de châtaigne est utilisée dans diverses applications agroalimentaires, notamment pour la fabrication du pain, des pâtisseries, des aliments infantiles et des produits biscuitiers (Mete *et al.* 2017). Toutefois, les produits sans gluten élaborés à partir de matières premières alternatives présentent souvent certaines limitations technologiques, notamment une texture fragile, une faible cohésion et des caractéristiques sensorielles parfois moins appréciées que celles des produits conventionnels contenant du gluten (Ferradji *et al.,* 2024). Ces contraintes nécessitent le développement de nouvelles stratégies permettant d'améliorer simultanément la qualité nutritionnelle, fonctionnelle et technologique de ces produits.

Parmi les approches actuellement explorées, la fermentation lactique apparaît comme une technologie particulièrement prometteuse. Les bactéries lactiques, notamment *Lactobacillus plantarum,* sont reconnues pour leur capacité à transformer les matrices végétales par l'intermédiaire de diverses activités enzymatiques, entraînant des modifications favorables de leur composition chimique et de leurs propriétés fonctionnelles (Filannino *et al.,* 2018). Plusieurs études ont démontré que la fermentation permet d'améliorer la biodisponibilité des nutriments, d'augmenter la teneur en composés bioactifs, de renforcer l'activité antioxydante et de réduire

certains facteurs antinutritionnels tels que les tanins et les inhibiteurs enzymatiques (Sancho *et al.* 2012 ; Ferradji *et al.* 2024 ; Sabater *et al.* 2024).

Malgré l'intérêt croissant accordé à la valorisation des matières premières végétales fermentées, les travaux consacrés à l'application de la fermentation lactique à la farine de châtaigne destinée à la fabrication de biscuits sans gluten demeurent encore limités. Cette situation met en évidence la nécessité d'approfondir les connaissances relatives aux effets de la fermentation sur les caractéristiques physicochimiques, technologiques, nutritionnelles et antioxydantes de cette matière première ainsi que sur la qualité des produits finis qui en sont issus.

1.1. Problématique

Dans ce contexte, la présente étude cherche à répondre à la question suivante :

Dans quelle mesure la fermentation lactique de la farine de châtaigne par *Lactobacillus plantarum* peut-elle améliorer ses propriétés physicochimiques, technologiques, et antioxydantes, ainsi que la qualité des biscuits sans gluten formulés à partir de cette farine ?

1.2. Hypothèse de travail

Cette étude repose sur l'hypothèse que la fermentation lactique de la farine de châtaigne par *Lactobacillus plantarum* (induit des transformations biochimiques capables d'améliorer ses propriétés nutritionnelles, fonctionnelles et technologiques, conduisant ainsi à l'obtention de biscuits sans gluten présentant de meilleures caractéristiques physicochimiques et sensorielles que ceux élaborés à partir de farine de châtaigne non fermentée.

1.3. Objectif général

L'objectif général de ce travail est d'évaluer l'effet de la fermentation lactique sur les propriétés physicochimiques, technologiques, nutritionnelles et antioxydantes de la farine de châtaigne ainsi que sur la qualité des biscuits sans gluten élaborés à partir de cette matière première.

1.4. Objectifs spécifiques

- Caractériser la farine de châtaigne avant et après fermentation en déterminant ses propriétés physicochimiques, technologiques et antioxydantes ;
- Formuler des biscuits sans gluten enrichis à différents taux en farine de châtaigne fermentée et non fermentée ;
- Déterminer quelques caractéristiques physicochimiques, technologiques et sensorielles des biscuits obtenus ;

Chapitre 1. Généralités sur le châtaignier (*Castanea sativa* Mill.)

1.1. Classification botanique

Le châtaignier (*Castanea sativa* Mill.) appartient à la famille des Fagaceae et constitue l'une des principales espèces fruitières forestières des régions tempérées d'Europe. Afin de situer cette espèce sur le plan systématique, la classification proposée par Cronquist (1981) est présentée ci-dessous :

Règne :	Plantae
Division :	Magnoliophyta
Classe :	Magnoliopsida
Ordre :	Fagales
Famille :	*Fagaceae*
Genre :	Castanea
Espèce :	*Castanea sativa Mill.*
Synonymes :	*Castanea vesca Gaertn.*
	Castanea vulgaris Lam.

L'aspect générale de cet arbre est illustré dans la Figure 1.



Figure 1: Photographie d'arbre du châtaignier (Castanea Sativa Mill). ClimEssences. (2024).

1.2. Répartition géographique

1.2.1 Dans le monde

L'aire d'origine du châtaignier s'étend sur les reliefs humides du pourtour méditerranéen, notamment au nord de la Méditerranée : dans le sud des Balkans (Grèce), en Italie, en Corse, dans le sud de la France, ainsi qu'au nord-ouest de la péninsule Ibérique. Son aire de distribution englobe également le sud-est de l'Europe, limité au nord par les Carpates, en évitant les plaines trop arides. On le retrouve fréquemment en Autriche, en Slovaquie, dans l'ex-Yougoslavie, en Albanie et en Roumanie. Vers l'est, il se prolonge jusqu'au sud de la mer Noire en Turquie, puis dans le Caucase, en Géorgie, en Arménie et en Azerbaïdjan. L'action humaine a considérablement élargi cette aire naturelle en Europe méridionale et occidentale, vers le nord jusqu'en Écosse et en Irlande, où il fut introduit par les Romains. Il est relativement abondant en Belgique, notamment en Flandre et dans le Hainaut, aux Pays-Bas hors des régions de polders, ainsi que dans les îles Britanniques. En Allemagne, sa présence est plus dispersée et se concentre principalement à l'ouest. Sous climat à influence continentale en Europe centrale et orientale, il se raréfie progressivement. En Afrique du Nord (Algérie, Maroc, Tunisie), il se cantonne aux zones les plus arrosées (Krebs *et al*., 2004).

La répartition géographique mondiale de *Castana sativa* Mill. est illustrée dans la figure 2.

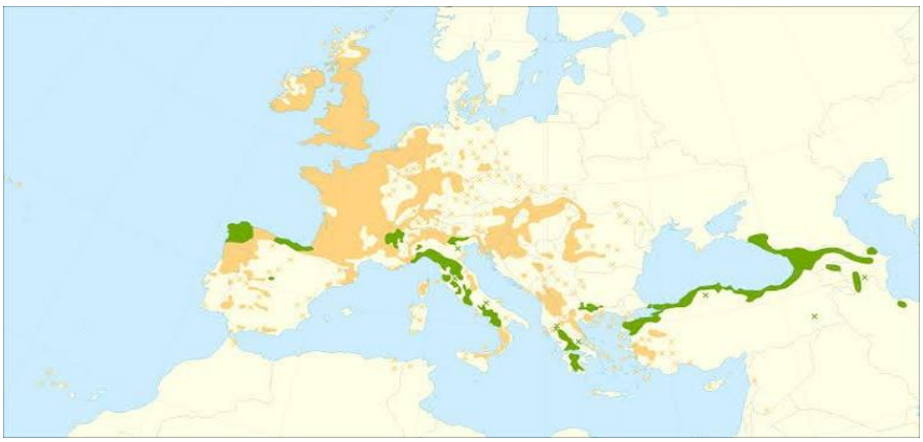


Figure 2: Distribution du Castanea Sativa Mill dans son aire géographique méditerranéenne (Conedera *et al*., 2016).

1.2.2. En Algérie

En Algérie, le châtaignier (*Castanea sativa* Mill.) est principalement localisé dans certaines régions montagneuses et humides du nord du pays, notamment dans les massifs forestiers de Collo, Ouled Attia, El Milia, l'Edough (Annaba), la Kabylie, le Djurdjura et la forêt de Hafir (Tlemcen). Ces zones offrent des conditions pédoclimatiques favorables à son développement (Rabhi et Messaoudene, 2018).

L'introduction et la diffusion du châtaignier ont été encouragées dès la fin du XIX^{e} siècle par les services forestiers, à travers des programmes de plantation et l'introduction de différentes variétés européennes, américaines et japonaises. Des plantations importantes ont notamment été réalisées dans les régions de Collo et d'Ouled Attia, qui sont devenues les principaux centres de production de châtaignes en Algérie (Rabhi et Messaoudene, 2018).

Grâce à son adaptation aux conditions écologiques de certaines régions du littoral et des zones montagneuses humides, le châtaignier constitue aujourd'hui une ressource forestière et fruitière d'intérêt économique, patrimonial et environnemental pour le pays (Rabhi et Messaoudene, 2018).

1.3. Composition chimique de la châtaigne

La châtaigne a joué un rôle fondamental dans l'alimentation humaine depuis l'Antiquité. Aujourd'hui, son intégration dans le régime alimentaire est fortement recommandée. L'eau constitue le composant principal de la châtaigne, avec une teneur en humidité variant entre 40 et 64 g/100 g de poids frais. Les études portant sur la composition chimique et nutritionnelle de la châtaigne confirment qu'elle est pauvre en graisses, exempte de cholestérol et de gluten. En revanche, elle constitue une source riche en amidon (glucides), en protéines, en fibres alimentaires, en vitamines, en minéraux tels que le potassium, le phosphore et le magnésium, ainsi qu'en lipides et en nutriments essentiels. De plus, elle représente une bonne source d'antioxydants, notamment l'acide ascorbique, les caroténoïdes et les composés phénoliques tels que l'acide gallique et l'acide ellagique.

Compte tenu des propriétés mentionnées, la châtaigne peut présenter des bénéfices pour la santé, suscitant ainsi l'intérêt des consommateurs. La valeur nutritionnelle de la châtaigne dépend de sa composition chimique, qui résulte de l'interaction entre le cultivar (génotype), les conditions environnementales (facteurs climatiques, température, rayonnement) et les pratiques de production

(composition minérale du sol, disponibilité des nutriments, maladies et ravageurs). Sur le plan nutritionnel, la châtaigne se distingue par des caractéristiques intéressantes : elle contient de grandes quantités de fibres alimentaires, mais de faibles teneurs en protéines brutes (2–4 %) et en lipides bruts (principalement des acides gras insaturés) (2–5 %), comparativement aux autres fruits à coque (noix, amandes, noisettes), ce qui en fait une bonne source d'énergie aux multiples bénéfices pour la santé. Sur la base du poids sec, les principaux composants de la châtaigne sont les glucides (75–91 %), dont l'amidon (39–82 %) constitue la fraction dominante, suivi du saccharose. Ces polysaccharides, ainsi que le glucose, le fructose et le raffinose également présents en quantités significatives peuvent contribuer à l'identification d'un cultivar particulier. Les chercheurs indiquent que l'amidon se décompose partiellement en glucose lors du stockage, conférant ainsi à la châtaigne une saveur plus sucrée. Par ailleurs, les châtaignes à haute teneur en amidon sont plus adaptées à la production de farine. La teneur en ces sucres et leur composition sont influencées par diverses conditions, telles que la température de stockage, l'humidité relative, le moment de la récolte, le niveau d'oxygène et même le mode de conditionnement.

Les châtaignes à faible teneur en humidité peuvent bénéficier d'une durée de conservation post-récolte plus longue, en raison d'un environnement moins propice à la croissance microbienne. La châtaigne est également pauvre en graisses, ce qui contribue à réduire les taux de cholestérol. De plus, elle est riche en vitamine C, en macroéléments (potassium, phosphore, magnésium, calcium, sodium) et en microéléments (manganèse, fer, zinc, cuivre).

Une étude portant sur la composition chimique de huit cultivars de châtaigne douce issus de trois régions à Appellation d'Origine Protégée (AOP) situées dans la région de Trás-os-Montes au Portugal a confirmé que la châtaigne contient des niveaux élevés d'amidon (43 g/100 g de matière sèche) et une faible teneur en graisses (3 g/100 g de matière sèche). Elle constitue également une bonne source de minéraux, avec notamment du potassium (≈ 750 mg/100 g MS), du phosphore (≈ 120 mg/100 g MS) et du magnésium (≈ 75 mg/100 g MS), ainsi que des acides aminés (6–9 g/100 g MS).

Le mode de traitement de la châtaigne torréfaction ou cuisson influence sa composition métabolique primaire et secondaire. La châtaigne torréfiée présente des teneurs plus élevées en protéines, en fibres insolubles et en fibres alimentaires totales. Lors de la cuisson, des modifications importantes interviennent dans la structure macromoléculaire de l'amidon, ce qui modifie sa

digestibilité et améliore sa biodisponibilité (Massantini *et al*., 2021).La composition nutritionnelle et minérale détaillée de la farine de châtaigne est présentée dans le Tableau 01.

Tableau 01 : Composition nutritionnelle et minérale de la farine de châtaigne (pour 100g) (Source : ANSES, Table Ciqual, 2025)

Paramètre	**Unité**	**Valeur**
Energie	Kcal	362
Energie	kJ	1530
Eau	g/100 g	5.52
Protéines	g/100 g	6.1
Glucide	g/100 g	70.4
Amidon	g/100 g	46.9
Fibres alimentaires	g/100 g	12.6
Cendres	g/100 g	2.34
Calcium	mg/100 g	61.6
Magnesium	mg/100 g	67.6
Fer	mg/100 g	<0.1
Zinc	mg/100 g	1.1
Vitamine C	mg/100 g	16
Vitamine B6	mg/100 g	0.58
Vitamine B9	µg/100 g	215

1.4. Intérêts nutritionnels

La châtaigne se distingue par un profil nutritionnel et thérapeutique d'une importance majeure, en faisant un pilier des régimes alimentaires équilibrés. Selon Lioré (2021), ce fruit constitue une source d'énergie durable grâce à sa richesse en glucides complexes et son faible indice glycémique, tout en étant une alternative sécuritaire pour les personnes intolérantes au gluten. Sur le plan préventif, elle joue un rôle crucial dans la réduction du stress oxydatif impliqué dans de nombreuses pathologies chroniques, grâce à sa concentration élevée en antioxydante tels que les caroténoïdes, les composés phénoliques et les vitamines C et E. Par ailleurs, les fibres solubles présentes dans ce fruit favorisent la santé cardiovasculaire en contribuant à la baisse du taux de cholestérol LDL (Enfin, malgré l'astringence conférée par les tanins, notamment dans la coque interne, ces derniers possèdent des propriétés biologiques bénéfiques (Ahmed *et al*., 2017), complétées par un apport généreux en potassium et en magnésium essentiel au bon fonctionnement cardiaque et nerveux.

1.5. Contraintes technologiques (sans gluten, richesse en amidon)

La fabrication de biscuits à base de farine de châtaigne présente plusieurs difficultés, notamment :

1.5.1 Absence de gluten

La châtaigne (Castanea sativa Mill.) est naturellement exempte de gluten, ce qui la distingue des céréales telles que le blé, l'orge et le seigle. Grâce à cette caractéristique, la farine de châtaigne constitue une alternative intéressante pour l'élaboration de produits destinés aux personnes atteintes de la maladie cœliaque ou présentant une sensibilité au gluten. De plus, la châtaigne possède une valeur nutritionnelle appréciable grâce à sa richesse en vitamines, en minéraux et en divers composés bioactifs bénéfiques pour la santé (Borges *et al.*, 2008).

Une revue narrative récente a confirmé le profil nutritionnel de la châtaigne, caractérisé par une absence totale de gluten, une richesse en vitamines du groupe B, en minéraux essentiels et en acides gras favorables, ainsi qu'une diversité de composés phytochimiques aux propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires et antimicrobiennes (Gomes-Laranjo *et al.*, 2025).

Du point de vue technologique, la châtaigne est considérée comme une culture de base importante, utilisée de manière similaire à la pomme de terre. Elle est devenue une source alternative de farine sans gluten de plus en plus valorisée dans les applications alimentaires modernes, avec une faible teneur en cendres, en matières grasses brutes et en protéines brutes (Borges *et al.*, 2008).

Des études récentes ont démontré que les farines de châtaigne, grâce à leurs propriétés d'absorption d'eau et d'huile ainsi qu'à leur profil protéique, présentent une bonne aptitude à la production de produits de boulangerie sans gluten et de pâtes fraîches, même à des niveaux d'enrichissement atteignant 25 %, ouvrant ainsi des perspectives intéressantes pour le développement de produits destinés aux personnes souffrant de maladie cœliaque ou d'intolérance au gluten (Bresciani *et al.*, 2024).

1.5.2. Teneur élevée en amidon

La châtaigne présente une composition glucidique remarquable : plus de 38 % de sa masse est constituée de glucides, dont les deux tiers sont de l'amidon, le tiers restant étant principalement

du saccharose complété par des sucres simples. Grâce à la composition de cet amidon et à la présence de fibres, la châtaigne présente un index glycémique modéré, ce qui signifie que le sucre entre lentement dans l'organisme sans provoquer de pic insulinique brutal (Nutriting, 2023).

Sur le plan physicochimique, l'amidon isolé de *Castanea sativa Mill.* Présente un profil cristallin de type B, avec une teneur totale en amylose de 26,6 %. Les températures de gélatinisation ont été mesurées entre 57,1 °C (onset), 61,9 °C (peak) et 67,9 °C (conclusion). Aucune trace d'amylose complexée aux lipides n'a été détectée, ce qui confère à cet amidon des propriétés fonctionnelles particulières (Correia et Beirão-da-Costa, 2013).

La châtaigne est riche en amidon de type B, similaire à l'amidon de maïs. Il est important de noter que lorsqu'elles sont cuites bouillies, grillées ou frites la teneur en amidon, en protéines solubles, en saccharose et en acides organiques est significativement inférieure à celle des châtaignes fraîches. Cependant, la teneur en amylose, en matières grasses, en protéines brutes et en polyphénols totaux varie légèrement selon les conditions de cuisson (Cruz, 2013 ; Li, 2016).

D'un point de vue quantitatif, pour 100 grammes de châtaigne séchée, on relève 36,5 g de glucides totaux, dont 28,5 g d'amidon et 8 g de sucres simples, associés à 7,45 g de fibres alimentaires, 2,2 g de lipides et 1,8 g de protéines, pour une valeur énergétique de 189 kcal (ANSES-CIQUAL, 2016).

1.6. Utilisation de la châtaigne

Le châtaignier présente un intérêt considérable au-delà de sa valeur thérapeutique. En effet, l'ensemble de ses composantes, notamment les feuilles, les fleurs, les fruits ainsi que les racines, trouvent de nombreuses applications dans différents secteurs tels que la pharmacologie (phytothérapie, gemmothérapie et homéopathie) ainsi que dans l'industrie cosmétique (Bounous, 2002). Quant à la châtaigne elle-même, elle se distingue par une grande polyvalence culinaire ; elle peut être consommée à l'état frais sous différentes formes de cuisson : crue, bouillie, grillée ou cuite sous la cendre. Elle peut également être transformée par séchage ou broyage en farine, permettant ainsi son incorporation dans la fabrication de divers produits de boulangerie et pâtisserie tels que les galettes, le pain et les crêpes. Par ailleurs, elle est largement utilisée sous forme de purée, de crème ou de marrons glacés (Mete & Dülger Altiner, 2017).

1.7. Conservation de la châtaigne

La conservation industrielle des châtaignes repose principalement sur le recours à des installations frigorifiques. Ce procédé s'effectue dans des espaces bien ventilés, où la température est maintenue entre 0 et 2°C et le taux d'humidité entre 90 et 95%. Afin de garantir leur qualité sanitaire, les fruits font l'objet d'une inspection régulière, généralement tous les sept jours, selon les normes phytosanitaires en vigueur (Giacalone et Bounous, 1993).

Chapitre 2. Fermentation lactique des matrices végétales et rôle de *Lactobacillus plantarum*

2.1. Rôle de la fermentation dans l'alimentation

La fermentation constitue une étape technologique essentielle pour améliorer la qualité nutritionnelle et fonctionnelle des aliments, notamment les matrices végétales riches en amidon et en fibres alimentaires, telles que les céréales, les pseudo-céréales, les légumineuses et les fruits à coque. Elle permet d'augmenter la biodisponibilité des nutriments en réduisant les facteurs antinutritionnels tels que les inhibiteurs de protéases, les tanins et l'acide phytique, qui limitent leur absorption. De plus, les bactéries lactiques possèdent des activités enzymatiques capables de dégrader ces composés indésirables, contribuant ainsi à la protection du consommateur. La fermentation améliore également les propriétés organoleptiques des aliments, notamment le goût, la texture et l'acceptabilité, grâce à la production de métabolites tels que les acides organiques et les composés aromatiques. Elle joue aussi un rôle important dans la sécurité alimentaire en produisant des substances antimicrobiennes qui inhibent les microorganismes pathogènes. Par ailleurs, elle favorise la libération de composés bioactifs, comme les polyphénols et les acides aminés libres, améliorant ainsi les effets bénéfiques sur la santé. Enfin, elle contribue à l'amélioration des propriétés fonctionnelles des aliments en augmentant des paramètres tels que l'acidité et la teneur en composés bioactifs, rendant les produits plus intéressants sur le plan technologique et nutritionnel (Sabater *et al*., 2024).

2.2. Généralités sur *Lactobacillus plantarum*

Lactobacillus plantarum est une bactérie lactique hétérofermentaire facultative. Elle est extrêmement tolérante aux diverses conditions hostiles, notamment les contraintes du tube digestif (une tolérance élevée au HCl et aux sels biliaires). De plus, *Lactobacillus plantarum* se trouve généralement dans le tractus gastro-intestinal humain et animal et dans la salive. Elle est considérée comme l'une des bactéries les plus importantes à gram positif selon la division des bactéries lactiques (LAB). Elle est acide-tolérante et croit à des températures comprises entre 15 et 45°C (Al-Tawaha et Meng, 2018).Il convient de noter que, suite à une révision taxonomique majeur du genre Lactobacillus basée sur le séquençage génomique, *Lactobacillus plantarum* a été officiellement reclassifiée en Lactiplantibacillus plantarum depuis 2020, conformément aux

travaux de Zheng *et al*. (2020). Les deux appellations sont utilisées dans la littérature scientifique selon la date de publication des études citées.

Lactobacillus plantarum peut posséder une activité tannase et elle est capable de métaboliser les acides phénoliques. Elle peut inhiber de nombreux micro-organismes pathogènes responsables des infections humaines.

Les avantages potentiels de *Lactobacillus plantarum* en tant que probiotique pour la santé humaine comprennent la régulation du système immunitaire, la réduction du taux de cholestérol, l'équilibre du microbiote intestinal et la réduction du risque de tumeurs (Al-Tawaha et Meng, 2018).

2.3. Rôle de *Lactobacillus plantarum*

Le rôle des bactéries ne se limite pas à la fermentation lactique dans la pâte à biscuits à la châtaigne ; il est également crucial pour la qualité du produit fini. L'ajout de cette souche à la farine végétale modifie directement les propriétés physiques de la pâte. Selon Mirzaei *et al.* (2026), la fermentation par *Lactobacillus plantarum* améliorerait les propriétés techniques de la farine, notamment en modifiant sa viscosité et sa capacité de rétention d'eau, ce qui compenserait l'absence de gluten et améliorerait la texture du biscuit. De plus, les bactéries contribuent à enrichir la valeur nutritionnelle du produit. Yang *et al*. (2020) confirment que ces bactéries stimulent un métabolisme intense lors de la fermentation des châtaignes, ce qui entraîne un enrichissement significatif de la valeur nutritionnelle par la conversion des macronutriments en molécules plus facilement digestibles. Par ailleurs, la diversité métabolique résultant de ce processus de fermentation entraîne une augmentation de la présence de composés bioactifs, ce qui renforce l'activité antioxydante et protège contre le stress oxydatif cellulaire (Zou *et al*. 2022).

En outre, en tant que milieu de culture protecteur, Lactobacillus plantarum garantit l'intégrité microbiologique de la filière de transformation de la châtaigne en inhibant la croissance des micro-organismes altérateurs (Capua *et al*., 2015). Enfin, sa durabilité lui permet de maintenir des niveaux de viabilité élevés tout au long de la période de stockage, assurant ainsi les propriétés probiotiques nécessaires aux aliments fonctionnels (Sirini *et al*., 2022).

2.4. Effets de la fermentation par *Lactobacillus plantarum*

2.4.1. Effet sur le pH

Lactobacillus plantarum est une bactérie lactique largement utilisée en fermentation alimentaire et reconnue pour ses propriétés probiotiques. Son rôle principal est lié à sa capacité à produire de l'acide lactique à partir de la fermentation des glucides, ce qui entraîne une diminution significative du pH du milieu. Cette acidification crée un environnement défavorable au développement des microorganismes pathogènes et d'altération, contribuant ainsi à la sécurité microbiologique et à la conservation des aliments (Hadef, 2012).

En outre, la baisse du pH influence les propriétés physico-chimiques des matrices alimentaires, notamment par la coagulation des protéines (comme la caséine dans le lait), améliorant ainsi la texture et les caractéristiques organoleptiques des produits fermentés (Béal *et al*. 2008).

Par ailleurs, *Lactobacillus plantarum* présente une bonne tolérance aux conditions acides, ce qui lui permet de survivre dans des environnements à pH bas, comme le tractus gastro-intestinal. Cette résistance à l'acidité constitue un critère important pour son utilisation en tant que probiotique (Monnet *et al*. 2008).

2.4.2 Effet sur la biodisponibilité des minéraux

Lactobacillus plantarum joue un rôle important dans l'amélioration de la biodisponibilité des minéraux grâce à plusieurs mécanismes biologiques et biochimiques. Tout d'abord, cette bactérie probiotique est capable de produire des acides organiques, notamment l'acide lactique, qui entraînent une diminution du pH intestinal, favorisant ainsi la solubilisation des minéraux tels que le fer, le zinc et le calcium, ce qui améliore leur absorption au niveau intestinal (Gobbetti *et al*., 2010). Ensuite, certaines souches de *Lactobacillus plantarum* possèdent une activité enzymatique, en particulier une activité phytasique, qui permet l'hydrolyse de l'acide phytique. Ce dernier est considéré comme un facteur antinutritionnel majeur car il forme des complexes insolubles avec les minéraux, réduisant ainsi leur biodisponibilité (Lopez *et al*. 2002 ; Reddy Nallapareddy R et Sathe, 2002).

Par ailleurs, le processus de fermentation impliquant *Lactobacillus plantarum* contribue à améliorer la qualité nutritionnelle globale des aliments, en augmentant la biodisponibilité des

nutriments et en réduisant les composés antinutritionnels, ce qui favorise indirectement une meilleure assimilation des minéraux (Hur Seung-Min *et al*., 2014).

Enfin, cette bactérie participe à l'équilibre du microbiote intestinal, ce qui améliore la santé digestive et optimise les mécanismes d'absorption intestinale. Un microbiote équilibré joue un rôle clé dans la régulation de l'absorption des nutriments, y compris les minéraux essentiels (Marco Maria L *et al*., 2017).

2.4.3. Sur les composés phénoliques

La fermentation lactique induite par la souche *Lactobacillus plantarum* constitue un levier technologique essentiel pour renforcer le pouvoir antioxydant de la farine de châtaigne selon trois voies complémentaires. La farine de châtaigne présente une grande diversité chimique végétale comprenant 13 acides phénoliques (tels que l'acide gallique et l'acide férulique), comme l'ont déterminé Oniszczuk *et al*. (2019). Toutefois, ces composés restent emprisonnés dans la matrice fibreuse. Grâce à la dominance et à la capacité d'adaptation de *L. plantarum* dans les substrats de châtaigne (Aponte *et al*., 2013), son activité enzymatique intense (notamment les estérases) rompt les liaisons entre les fibres et les composés phénoliques, ce qui facilite leur libération et leur absorption biologique.

Les bactéries transforment ainsi les acides phénoliques complexes en molécules plus simples, plus actives et plus stables. Une étude de Yilmaz-Ersan *et al*. (2023) a démontré que cette fermentation probiotique conduisait à une « formation métabolomique » complexe donnant naissance à 48 nouveaux métabolites, ce qui rendait le produit plus fonctionnel.

Les composés phénoliques libérés de la matrice fibreuse agissent en effet comme des boucliers naturels qui empêchent l'oxydation et l'altération des lipides (Paciulli *et al*., 2018). De plus, les recherches de Pinto *et al*. (2021) confirment que ces composés, en particulier l'acide gallique et l'acide ellagique, sont les principaux responsables de l'activité antioxydante élevée et de l'acceptation sensorielle exceptionnelle du biscuit fonctionnel. Ce dernier est donc un produit sûr, sain et attrayant pour le consommateur.

Chapitre 3. Biscuiterie et farines alternatives

3.1. Technologie du biscuit

3.1.1. Histoire d'apparition du biscuit

La consommation de biscuits s'est répandue dans le monde entier ces dernières années (Okpala *et al.* 2013). Cela s'explique par leur goût sucré, leur praticité, leur prix abordable et leur longue conservation (Sudha *et al*. 2007 ; Vujic *et al.*, 2014). Leur origine remonte à des milliers d'années, lorsque la bouillie de céréales fut transformée en pain plat, le premier aliment condensé pouvant être conservé (Zhou, 2014).

3.1.2. Définition des biscuits

Le mot biscuit est dérivé du Latin « panis biscotis » qui signifie le « pain cuit deux fois ». C'est parce que le processus original consistait à cuire les biscuits dans un four chaud puis à sécher dans un autre à température plus basse. D'abord pour définir la structure, puis pour réduire la teneur en humidité **(**Serrem, et Zhou, 2014).

Les biscuits normaux sont cependant seulement cuits une fois. Les biscuits se distinguent des autres produits de boulangerie par leur faible taux d'humidité ce qui les rend peu susceptibles de subir une altération microbienne **(**Serrem, 2010**).** Le terme biscuit fait référence aux produits de boulangerie cuits au four contenant trois principaux ingrédients, à savoir la farine de blé tendre, le sucre et la matière grasse avec autres ingrédients mineurs tels que le lait, sel, agent aromatisant et les agents d'aération **(**Devi et Khatkar, 2016 ; Mamat et Hill, 2014). Les ingrédients sont mélangés et la pâte est découpée en morceaux de la taille souhaitée puis cuite pendant quelques minutes **(**Ansari et Kumar, 2012).

3.1.3. Technologie des biscuits

La technologie des produits céréaliers comprend 8 étapes : mixage, pétrissage, fermentation, laminage, mise en forme, cuisson, refroidissement et conditionnement

-La qualité des biscuits est influencée par plusieurs facteurs tels que la qualité et la quantité des ingrédients utilisés et les traitements effectués comme le pétrissage, la fermentation et la cuisson (Sudha *et al*. 2007 ; Devi et Khatkar, 2016).

3.1.4. Etapes de fabrication des biscuits

3.1.4.1. Mixage

Le mixage est la première étape dans le processus de préparation des biscuits

Cette opération permet de mélanger le sucre, la matière grasse, les œufs et autres ingrédients afin qu'ils forment une masse cohérente (Maache-Rezzoug *et al*. 1998b ; Noah, 2017). Ce procédé est accompli avec trois principaux types de mixage : mixage à broche verticale, mixage à tambour horizontal et mixage continu (Saadoudi, 2019).

3.1.4.2. Pétrissage

Le pétrissage est une opération qui va aboutir à la formation d'un produit

Viscoélastique à partir de deux constituants : eau et farine. Quand l'eau est ajoutée à la farine, elle se répartit d'abord grossièrement dans la masse farine, puis le pétrissage oblige l'eau à envelopper tout d'abord chaque particule de farine et à y pénétrer. En effet, cette eau chasse l'air inclus dans la farine. L'incorporation d'air dans la masse permet à la pâte de se détacher aux parois de la cuve du pétrin et elle devient lisse, sèche et élastique (Saadoudi, 2017).

On distingue trois types de pétrissage :

• Le pétrissage conventionnel : qui assure un travail mécanique souvent insuffisant avec les farines actuelles dont le gluten est relativement tenace ;

• Le pétrissage intensifié : qui donne des pâtes suroxydées ;

• Le pétrissage amélioré : qui assure le meilleur équilibre entre le développement de la pâte et la conservation de sa texture, de son goût et de ses arômes (Saadoudi, 2019).

Sous l'effet d'un bon pétrissage les protéines du gluten mènent à la formation d'un réseau cohésif et assurent une meilleure élasticité et rétention de gaz. Un pétrissage trop important forme une pâte cassante sous l'effet des interactions fortes entre les protéines.

L'étape de pétrissage assure quatre fonctions intimement liées, essentielles pour l'obtention d'une pâte bien aérée :

✓ Le mélange des différents ingrédients en une pâte homogène ;

✓ Le développement du réseau glutineux

✓ La structuration du réseau protéique ;

✓ L'incorporation de l'air dans la pâte pour favoriser la multiplication des levures (Lassoued-Oualdi, 2005 ; Nhouchi *et al*. 2018).

Le pétrissage est employé afin de développer un produit avec des caractéristiques désirables plutôt qu'assurer l'homogénéité, cependant un pétrissage excessif peut altérer la pâte (Fellow, 2000).

3.1.4.3. Fermentation

La pâte des biscuits pétrie est transférée dans une cuve à 25 °C pour un repos de durée variable et pour permettre la fermentation. La pâte est fermentée généralement à 25 et 32 °C pendant une période donnée. La fermentation fournit une pâte extensible, lisse avec une bonne rétention des gaz (Mousavi Khaneghah *et al.,* 2018).

3.1.4.4. Laminage

Le laminage est la méthode la plus courante pour former la pâte biscuitière en feuille. Il implique la production d'une feuille de pâte épaisse, dont l'épaisseur est réduite en passant par divers lamineurs rotatoires (Manley, 1998a ; Manley, 2001).

3.1.4.5. Découpage (moulage)

Le découpage est l'étape qui suit le laminage. A l'échelle industrielle, des coupeurs et mouleurs rotatoires gravent et coupent la pâte biscuitière préalablement laminée. Il est évidemment souhaitable que tous les morceaux de pâte aient des poids et dimensions identiques (Manley, 1998a).

3.1.4.6. Cuisson

La cuisson est une étape complexe au cours de laquelle a lieu une série de transformations physiques, chimiques et biochimiques (Lassoued-Oualdi, 2005 Ndangui, 2015).

Ainsi, selon le type de produit céréalier, le temps de cuisson peut varier de 6 à 10 minutes pour une température de cuisson variant entre 180 et 220°C (Manley, 2000).

-Plusieurs réactions physicochimiques se produisent pendant la cuisson des biscuits :

- La fonte des graisses entre 15 et 50 °C favorise l'étalement de la pâte.
- Dissolution des sucres : la moitié des sucres se dissolvent lors de pétrissage et le reste à l'état cristallin se dissolve lors de cuisson. Cela augmente également la fluidité et permet à la pâte de s'étaler.

• Gélatinisation de l'amidon entre 52 et 95 ° C. En général, l'amidon n'est que partiellement gélatinisé dans les biscuits et les granules d'amidon conservent leur intégrité morphologique en tant qu'amidon natif.

• Les poudres à lever deviennent actives entre 55 et 70 °C en libérant du CO2 et du NH3.

• Le réseau de protéines peut se développer, ce qui s'accompagne d'une augmentation de la viscosité.

• La pâte continue à se dilater en raison de la production et de la dilatation thermique du gaz.

• La perte d'eau et le séchage des biscuits se poursuivent jusqu'à atteindre une teneur en humidité basse avec une rigidité de structure.

• Enfin, La formation de dérivés de réaction de Maillard, la caramélisation des sucres et la dextrinisation de l'amidon accompagnent la modification de la couleur de surface et la génération d'arômes caractéristiques des produits de boulangerie lors de la cuisson (Purlis, 2010).

3.1.4.7. Refroidissement de biscuit

Après la cuisson au four, la plupart des biscuits sont envoyés directement pour être empaquetés. Ils sont habituellement refroidis avant l'empaquetage. Le refroidissement est nécessaire pour les biscuits riches en sucre car ces derniers sont très doux et plastifiants à la sortie de four et se rigidifient quand ils refroidissent. Il y a également une petite perte d'humidité des biscuits qui est bénéfique pour leur qualité et leur durée de conservation (Manley, 1998b).

3.1.4.8. Conditionnement et conservation de biscuit

La conservation des biscuits doit avoir lieu à l'abri de 1'humidité. En raison de leur composant sensible aux réactions d'oxydation et à la lumière ; son conditionnement doit donc être adéquat (Fredot, 2005).

3.2. Effets des substitutions partielles

Remplacer une partie de la farine de blé par de la farine de châtaigne permet de réduire la teneur en gluten des biscuits, ce qui modifie leurs propriétés techniques, fonctionnelles et sensorielles.

Bien que la farine de châtaigne ne contienne pas de gluten‹ son ajout à la farine de blé perturbe la continuité du réseau de gluten. Paradoxalement, cette diminution de la force du pain est bénéfique pour la fabrication des biscuits, car une élasticité excessive est indésirable. Selon

Demirkesen (2016), un taux de substitution modéré d'environ 40 % permet d'obtenir la texture la plus moelleuse. Ceci est dû à l'interpénétration des fibres de châtaigne et des granules d'amidon au sein du réseau protéique, ce qui limite la formation d'une structure trop élastique et favorise le feuilletage recherché.

D'autres études‹ comme celles de Demirkesen (2016) et Pinto *et al*. (2021), ont montré que la farine de châtaigne avait une forte capacité d'absorption d'eau. Dans un produit composite blé-châtaigne, une compétition pour l'eau libre s'instaure entre les polymères d'amidon et les fibres de cellulose. Cette réaction augmente la viscosité de la pâte et limite son étalement à la cuisson. Ceci s'explique par une diminution du rapport épaisseur/étalement. Les biscuits obtenus sont généralement plus épais et de diamètre plus petit, comme le confirme Demirkesen (2016) qui a établi un lien entre un taux de substitution accru et la hauteur du produit final.

Selon les études de Demirkesen (2016) et Pinto *et al*. (2021) la forte teneur en sucres réducteurs des châtaignes (20 à 32 %) favorise les réactions de Maillard et la caramélisation lors du traitement thermique. Cette réaction avec les acides aminés du blé intensifie la couleur de la croûte, lui donnant une teinte brun doré caractéristique. Outre cet aspect esthétique, ces réactions produisent des composés volatils qui enrichissent l'arôme du biscuit et masquent le goût neutre de l'amidon de blé.

3.3. Définition d’un aliment fonctionnel

Selon Anthony Fardet (2019), la conception actuelle de l'« aliment fonctionnel » s'inscrit majoritairement dans une approche réductionniste. Cette vision, souvent qualifiée de « nutritionnisme », considère l'aliment comme une simple somme de nutriments isolés ou de calories. Dans cette optique, l'aliment fonctionnel est un produit fractionné puis recombiné, enrichi en micronutriments (vitamines, minéraux) ou en phytonutriments pour compenser un régime déséquilibré ou viser un effet pharmacologique spécifique. Cependant, l'auteur propose une transition vers un nouveau paradigme holistique où tout aliment est intrinsèquement « fonctionnel ». Cette nouvelle définition soutient que le potentiel santé d'un aliment ne dépend pas uniquement de sa composition chimique, mais surtout de la structure de sa matrice (l’effet matrice), qui influence la satiété et la biodisponibilité des nutriments dans l'organisme. Ainsi, la fonctionnalité

réelle doit être comprise comme une interaction complexe entre l'aliment, son degré de transformation et le mode de vie global de l'individu.

3.4. Tendances produits fonctionnels

Le domaine des aliments fonctionnels connaît actuellement une transition majeure vers l'exploitation des ressources végétales locales pour la production de snacks à haute valeur nutritionnelle, tels que les biscuits. Dans ce contexte, l'incorporation de la poudre de châtaigne émerge comme une tendance croissante visant à renforcer la teneur en composés phénoliques et l'activité antioxydante des produits sans gluten (Stoin *et al.*, 2025). Cette évolution s'aligne sur la tendance mondiale de la "fonctionnalité naturelle", qui privilégie l'optimisation de la matrice alimentaire plutôt que l'ajout de nutriments isolés ; un objectif atteint grâce à la fermentation qui améliore la bioaccessibilité des composés actifs (Fardet, 2019). De plus, les aliments fermentés s'imposent comme un pilier fondamental de la nutrition du futur, en raison de leur capacité à générer des micro-organismes bénéfiques et des "postbiotiques" soutenant naturellement la santé digestive et immunitaire (Univadis, 2026). Par ailleurs, l'innovation dans l'industrie des biscuits fonctionnels s'oriente vers des procédés traditionnels, tels que la fermentation lactique, pour réduire l'indice glycémique et améliorer les propriétés sensorielles des produits végétaux sans recours aux additifs chimiques, répondant ainsi aux attentes des consommateurs pour des produits "Clean Label" (Otles *et al.*, 2023 ; Mintel, 2025).

Matériels et Méthodes

L'ensemble des travaux expérimentaux a été réalisé au sein des laboratoires pédagogiques du Département d'Agronomie de l'Université 20 Août 1955 de Skikda, ainsi qu'au niveau du laboratoire étatique de contrôle de la qualité et de la répression des fraudes à Bouabaz (Skikda).

La démarche expérimentale a été conduite selon les étapes successives suivantes :

- **Collecte et préparation des matières premières.**
- **Préparation des farines de châtaigne :** Préparation des lots de farine fermentée (FCF) et non fermentée (FCNF).
- **Caractérisation des farines :** évaluation des propriétés physico-chimiques technologiques et des propriétés antioxydantes.
- **Fabrication des biscuits sans gluten :** élaboration du témoin et des formulations enrichies en farines de châtaigne (fermentée et non fermentée).
- **Analyse de la qualité des biscuits formulés :** caractérisation physico-chimique évaluation des propriétés technologiques et analyse sensorielle des produits finis.

1. Nature et origine de la matière première

1.1. Matériel végétal

Les châtaignes (*Castanea sativa* Mill.) ont été approvisionnées au cours du mois de novembre 2025 sur le marché local situé à Hamadi Kroma de la wilaya de Skikda (Algérie). Les échantillons retenus pour l'expérimentation ont été rigoureusement sélectionnés selon des critères de fraîcheur et de maturité optimale, en veillant à l'absence totale d'altérations mécaniques ou d'infections d'origine pathogène.

1.2. Microorganisme de fermentation

La fermentation de la farine de châtaigne a été réalisée à l'aide d'une souche bactérienne pure de *Lactobacillus plantarum* HP59, appartenant au groupe des bactéries lactiques largement utilisées dans les procédés de fermentation alimentaire.

La souche utilisée se présente sous forme de poudre lyophilisée hautement purifiée, produite en Californie (États-Unis) et conditionnée sans aucun additif ni ingrédient supplémentaire.

Selon les spécifications techniques fournies par le fabricant, chaque gramme de produit (1000 mg) renferme une concentration microbiologique de **100 milliards** d'unités formant colonies (UFC), soit **1×10^{11} UFC/g**.

Le choix de *Lactobacillus plantarum* repose sur sa capacité à s'adapter à différents substrats végétaux, à produire de l'acide lactique et divers métabolites d'intérêt technologique, ainsi qu'à améliorer les propriétés nutritionnelles, fonctionnelles et organoleptiques des matières premières fermentées (Chiacchio *et al.* 2025). Cette souche a ainsi été utilisée pour conduire la fermentation contrôlée de la farine de châtaigne dans le cadre de la présente étude.

1.3. Ingrédients de formulation des biscuits

Les différents ingrédients commerciaux intégrés dans la formulation des biscuits ont tous été acquis sur le marché local algérien. Ils se composent de :

- **Farines de base :** Farines de riz et de maïs.
- **Matière grasse et agent sucrant :** Matière grasse (le margarine) et sucre cristallisé commercialisé.
- **Agents levant et d'assaisonnement :** Levure chimique et sel fin de table.
- **Liants et solvants :** Œufs frais entiers et l'eau. L'utilisation exclusive d'eau garantit la répétabilité des mesures expérimentales en s'affranchissant des variations potentielles de la composition physico-chimique de l'eau de réseau.

2. Préparation de la farine de châtaigne

Les châtaignes fraîches ont été soigneusement sélectionnées afin d'éliminer les fruits endommagés ou présentant des altérations visibles.
Les châtaignes ont été immergées dans l'eau chaude pendant 10 min afin de faciliter le pelage manuel de l'enveloppe externe (péricarpe) ainsi que la pellicule interne (tégument), puis découpées en fragments de taille homogène afin de faciliter le séchage.

Les morceaux obtenus ont été soumis à un séchage en étuve ventilée à une température de 45 à 50 °C jusqu'à l'obtention d'une masse constante, garantissant une élimination efficace de l'humidité tout en limitant la dégradation thermique des composés thermosensibles. Après séchage, les échantillons ont été broyés à l'aide d'un broyeur électrique jusqu'à obtention d'une poudre fine

et homogène. La poudre obtenue a été tamisée (maille ≤ 200 µm) afin d'uniformiser la granulométrie et d'améliorer la reproductibilité des analyses ultérieures.

3. Préparation du substrat fermentescible et conduite de la fermentation

La préparation du substrat de fermentation a été réalisée selon une méthodologie adaptée du protocole de Chiacchio *et al*. (2025), initialement développé pour la fermentation de purées de pois chiche par des bactéries lactiques. Des modifications ont été apportées afin de prendre en considération les caractéristiques particulières de la farine de châtaigne, notamment sa richesse en amidon et en fibres alimentaires.

3.1. Préparation de l'inoculum bactérien

La fermentation de la farine de châtaigne a été réalisée à l'aide d'une souche pure de *Lactobacillus plantarum* HP59.

Compte tenu de la concentration initiale de la préparation lyophilisée (10^{11} UFC/g), une quantité de 0,04 g a été pesée puis réhydratée dans 50mL d'eau distillée stérile refroidie afin de préparer la suspension d'inoculation. Cette quantité a été calculée de manière à obtenir une charge microbienne initiale théorique d'environ 10^7 UFC/g de substrat fermentescible, valeur couramment utilisée dans les procédés de fermentation lactique.

3.2. Conduite de la fermentation

Le substrat fermentescible a été préparé à partir de 400 g de farine de châtaigne auxquels ont été ajoutés 450 mL d'eau distillée stérile. Après homogénéisation, le pH initial du mélange a été mesuré avant l'inoculation. La suspension bactérienne (50 mL) a ensuite été incorporée au substrat, portant le volume total d'hydratation à 500 mL, ce qui correspond à un taux d'hydratation de 125 % (base farine) et à une teneur en eau d'environ 55,5 %.

Ces conditions sont favorables au développement des bactéries lactiques. Le mélange a été soigneusement homogénéisé jusqu'à l'obtention d'une pâte semi-fluide, homogène et exempte de grumeaux.

La pâte inoculée a ensuite été transférée dans des récipients hermétiquement fermés puis incubée à 37 °C pendant 24 heures dans des conditions anaérobies. À l'issue des 24 h d'incubation, le pH du substrat a atteint 4,8, traduisant l'activité métabolique de *Lactobacillus plantarum* HP59 et l'acidification du milieu par la production d'acides organiques. La fermentation a alors été interrompue afin d'éviter une acidification excessive susceptible d'altérer les propriétés technologiques et sensorielles de la farine fermentée.

Le substrat fermenté a ensuite été soumis aux opérations de séchage et de broyage décrites ci-dessous.

3.3. Traitement post-fermentation

La pâte fermentée a été étalée uniformément en couche mince sur des plateaux puis séchée dans une étuve ventilée à 50 °C pendant 12 heures. Le séchage a été poursuivi jusqu'à l'obtention d'une humidité résiduelle inférieure à 14 %.

Après séchage, les échantillons ont été refroidis à température ambiante puis broyés à l'aide d'un broyeur électrique afin d'obtenir une poudre fine. La farine fermentée obtenue a ensuite été tamisée pour homogénéiser la granulométrie et éliminer les particules grossières.

La farine ainsi préparée a été conditionnée dans des récipients hermétiques et conservée à l'abri de l'humidité et de la lumière jusqu'à sa caractérisation physicochimique et son utilisation dans les formulations biscuitières.

4. Détermination de la composition biochimique des farines de châtaigne fermentées et non fermentées

Les analyses physico-chimiques ont été effectuées pour les farines de châtaigne fermentées et non fermentées, au sein des laboratoires de Département d'Agronomie (Université de Skikda).

4.1. Détermination du pH

La mesure du pH a été réalisée conformément à la méthode AACC 02-52.01 (AACC, 2000). À cet effet, 5 g de chaque échantillon finement broyé ont été précisément pesés et mis en suspension dans 50mL d'eau distillée. La suspension obtenue a été bien homogénéisée à pendant 2 minutes. Après une phase de décantation, la mesure du pH a été effectuée directement sur le surnageant à

l'aide d'un pH-mètre préalablement étalonné (De marque *inoLab*). La valeur du pH a été relevée directement sur l'affichage de l'appareil.

4.2. Acidité titrable

La quantification de l'acidité titrable repose sur la méthode normalisée NF V05-101 (1974). Elle est réalisée par titrage acido-basique de l'échantillon aqueux à l'aide d'une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH), le point d'équivalence étant mis en évidence par le virage de la phénolphtaléine.

- ✓ **Mode opératoire**

Une quantité de **0,5g** de chaque échantillon a été placée dans une fiole jaugée contenant déjà **50 ml** d'eau distillée. Le mélange a été agité vigoureusement jusqu'à obtention d'un liquide homogène. Ensuite, le mélange a été chauffé pendant 30 min puis filtrée. Un volume de **10 ml** de la solution filtrée a été prélevé à l'aide d'une pipette et déposé dans un bécher à ce bécher un volume de 10 ml d'eau distillée bouillie a été ajouté. 2 à 3 gouttes de phénolphtaléine ont été incorporées à la solution pour servir d'indicateur coloré. La titration a été réalisée en ajoutant progressivement une solution de NaOH de concentration (0,1 N) tout en agitant jusqu'à l'obtention d'une couleur rose persistante.

- ✓ **Expression des résultats**

L'acidité titrable est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$\textbf{\textit{Acidité titrable}}\ (\%) = \frac{\boldsymbol{V_1 \times N_{NaOH} \times 0.07 \times V_{extraction} \times 100}}{\boldsymbol{M \times V_0}}$$

Où :

- **V1 :** volume consommé du NaOH en mL (1.5mL)
- **N_{NaOH} :** concentration de la solution de NaOH 0,1N
- **0,07 :** Facteur de conservation de l'acidité titrable en équivalent d'acide citrique
- **V Extraction :** 50 mL

- **V0 =** Volume en millilitre de prise d'essai = 10mL
- **M =** Masse en gramme du produit prélevé = 0,5g

4.3. Détermination de la teneur en eau

La teneur en humidité des échantillons a été déterminée selon la méthode AOAC 926.12 (AOAC, 2005). Une prise d'essai de **3 g** de chaque échantillon est placée dans un creuset préalablement taré, puis soumise à un séchage dans une étuve ventilée (Memmert, Allemagne) à 105 °C jusqu'à obtention d'un poids constant. Après séchage, les creusets sont refroidis dans un dessiccateur afin d'éviter toute reprise d'humidité, puis pesés.

L'ensemble des analyses a été réalisé en triplicata. Le pourcentage d'humidité (**H%**) de chaque échantillon est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$H(\%) = \frac{m1-m2}{m} \times 100$$

En g pour 100 g de poudre, où :

- **m :** masse de la prise d'essai en g.
- **m1 :** masse de la prise d'essai avec le creuset en g.
- **m2 :** masse du résidu sec avec le creuset en g

4.4. Détermination de la teneur en cendres

Le dosage des cendres repose sur le principe de l'incinération complète de la matière organique sous l'effet d'une température élevée, ne laissant subsister que la fraction minérale de l'échantillon. L'analyse a été réalisée selon la méthode officielle **AOAC 942.05 (AOAC, 2005)**.

- ✓ **Mode opératoire**

Une masse de **3 g** de chaque échantillon est précisément pesée dans des creusets préalablement tarés, puis introduite dans un four à moufle (*Thermo Scientific – Thermolyse*) réglé à **550 °C**. L'incinération est maintenue jusqu'à l'obtention d'un résidu inorganique constant, de couleur blanche ou blanc grisâtre, signe d'une combustion réussie.

À la sortie du four, les creusets sont transférés dans un dessiccateur afin de refroidir à température ambiante à l'abri de l'humidité, puis pesés avec précision. Chaque détermination a été effectuée en triplicata, afin d'assurer la fiabilité et la reproductibilité des résultats.

✓ **Expression des résultats**

Le taux de cendres totales (C%**)**, exprimé en pourcentage de matière sèche, est calculé selon la relation suivante :

$$\textbf{Taux de cendre}\ (\%) = \frac{\mathbf{m1}}{\mathbf{m}} \times \mathbf{100}$$

En g pour 100 g de poudre

Où :

- **m :** masse de la prise d'essai avant incinération en g.
- **m1 :** masse du résidu après incinération en g.

4.5. Détermination de la teneur en fibres

✓ **Principe**

La méthode AOAC repose sur une double hydrolyse séquentielle de l'échantillon : d'abord en milieu acide (H_2SO_4), puis en milieu basique (NaOH). La fraction résiduelle insoluble correspond aux fibres brutes, dont la teneur est déterminée gravimétiquement après séchage et incinération.

✓ **Mode opératoire**

- Peser environ 2 g d'échantillon homogénéisé (masse notée Ws). Verser 200 mL de solution de H_2SO_4 (0,128 mol/L) dans un erlenmeyer de 500 mL.
- Ajouter l'échantillon et porter à ébullition sur plaque chauffante pendant **30 minutes** avec agitation périodique.
- Filtrer le contenu à chaud à travers un tissu de coton, puis laver le résidu et l'erlenmeyer à l'eau chaude afin d'éliminer toute trace d'acide.
- Remettre le résidu dans l'erlenmeyer lavé, ajouter 200 mL de solution de NaOH (0,313 mol/L), et porter à nouveau à ébullition pendant **30 minutes**.
- Filtrer à nouveau sur tissu de coton et laver soigneusement à l'eau chaude pour éliminer tout résidu de NaOH. Le résidu sur le tissu représente les fibres brutes.
- Transférer les fibres dans un creuset propre et préséché. Placer le creuset sur plaque chauffante pour éliminer l'excès d'eau, puis sécher à l'étuve à **130 °C pendant 2 heures**. 7-Refroidir au dessiccateur et peser (W_1, en grammes).

- Incinérer le creuset contenant les fibres au four à moufle à **550 °C pendant 2 heures**.
- Refroidir au dessiccateur et peser (W_2, en grammes).

✓ Le taux de fibres brutes (F) est calculé par la formule suivante :

$$F = \frac{M1 - M2}{M_S} \times 100$$

Où :

- **M1** = masse du creuset + fibres après séchage (g)
- **M2** = masse du creuset + cendres après incinération (g)

Ms = masse de l'échantillon initial (g)

4.6. Détermination de la teneur en protéines

Le dosage des protéines est réalisé par la quantification de l'azote total selon la méthode normalisée NF V03-050 (AFNOR, 1991).

✓ **Principe**

Le principe repose sur une minéralisation par voie humide, au cours de laquelle l'azote organique de la matrice est converti en sulfate d'ammonium $(NH4)_2SO4$ sous l'action combinée de l'acide sulfurique concentré et d'un système catalyseur (Saadoudi, 2019). Après alcalinisation de la solution minéralisée, l'ammoniac (NH_3) libéré est isolé par entraînement à la vapeur, piégé dans une solution d'acide borique, puis dosé par titrage acido-basique. La teneur en protéines brutes est enfin calculée en multipliant la concentration en azote total par le coefficient de conversion approprié (AFNOR, 1991).

✓ **Mode opératoire**

Avant de procéder au dosage de l'azote total, l'échantillon doit subir une minéralisation.

1. Minéralisation

- Introduire dans un matras de minéralisation 2 g de l'échantillon ;
- Ajouter une pincée (0,7 g) d'oxyde de mercureux et 15 g de sulfate de potassium
- Ajouter 25 ml d'acide sulfurique concentré ;
- Ajouter un morceau de paraffine pour éviter le phénomène de barbotage ;

- Utiliser un chauffage progressif, d'abord une attaque à froid pendant 15 minutes jusqu'à l'apparition de vapeur blanche d'anhydride sulfurique,
- Puis le chauffage est rendu plus énergique (attaque à chaud) pendant 4 à 5 heures ;
- Après décoloration complète, la solution est refroidie à 25 °C par l'ajout de 200 ml d'eau distillée.

2. Distillation

- Ajouter 75 ml de la solution de soude minéralisée ensuite distiller
- Le dégagement d'ammonium est récupéré dans 50 ml de solution d'acide borique contenant l'indicateur coloré
- Arrêter la distillation après avoir récupérer 150 ml du distillat (volume total environ 200 ml)
- Doser l'excès d'ammonium par l'acide chlorhydrique à 0,1 N.

✓ **Expression des résultats**

La teneur en azote total est déterminée par la formule suivante :

$$\boldsymbol{N(\%) = \left(\frac{1.4007 \times (Ve - Vb) \times N}{m}\right) \times 100}$$

Où :

- **1,4007 :** Milliéquivalent de l'azote (14,007 mg/mEq : 10).
- **Ve (ml) :** Volume d'acide chlorhydrique utilisé pour le titrage de l'échantillon ;
- **Vb (ml) :** Volume d'acide chlorhydrique utilisé pour le titrage de témoin ;
- **N :** normalité de la solution d'acide chlorhydrique (0,1 N) ;
- **m (g) :** masse en g de la prise d'essai.

Pour obtenir la teneur en protéine, on multiplie le taux d'azote par un facteur de conversion **6,25** selon la formule suivante :

$$\textbf{Protéine (\%) = N (\%) × 6,25}$$

Où :

6,25 : Facteur de conversion c'est le taux moyen d'azote des protéines (16 g d'N/100g de protéines)

N (%) : Pourcentage d'azote total **(**Saadoudi, 2019**).**

4.7. Détermination de la teneur en matières grasses

La détermination de la teneur en matières grasses a été réalisée par extraction au Soxhlet, conformément à la norme **ISO 11085**, afin d'évaluer la richesse lipidique des biscuits et leur contribution à la valeur énergétique.

✓ **Principe**

La méthode Soxhlet repose sur l'extraction continue des matières grasses contenues dans l'échantillon à l'aide d'un solvant organique (Hexane). Sous l'effet de cycles successifs de chauffage et de condensation, le solvant dissout les lipides présents dans l'échantillon. Après extraction, le solvant est évaporé et le résidu obtenu correspond à la fraction des matières grasses.

✓ **Mode opératoire**

Peser environ 2 g d'échantillon finement broyé. Introduire l'échantillon dans une cartouche d'extraction. Placer la cartouche dans l'extracteur Soxhlet. Ajouter l'éther de pétrole dans le ballon. Effectuer l'extraction pendant environ 6 heures. Après extraction, évaporer le solvant. Sécher le ballon contenant les matières grasses à l'étuve, puis peser.

✓ **Expression des résultats**

Matières grasses [%] = poids des matières grasses /poids de l'échantillon *100

4.8. Détermination de la teneur en sucres totaux (ST)

✓ **Principe**

La teneur en sucres totaux est déterminée par la méthode colorimétrique au phénol-acide sulfurique, selon le protocole de Dubois *et al*. (1956). Le principe repose sur la déshydratation acide des oses à chaud : les hexoses sont convertis en hydroxyméthylfurfural (HMF) et les pentoses en furfural. En présence de phénol, ces dérivés furaniques forment un complexe coloré jaune-orangé dont l'intensité est proportionnelle à la concentration en glucides. La lecture de l'absorbance est effectuée à une longueur d'onde de 490nm.

- ✓ **Mode opératoire**

Le dosage a été réalisé selon les étapes suivantes :

1. **Préparation des extraits glucidiques**

Une prise d'essai de 2 g de poudre (farine de châtaigne) est mise en suspension dans 100 ml d'eau distillée. Le mélange est maintenu sous agitation thermique sur plaque chauffante à 60°Cpendant 40 minutes. Après refroidissement, la suspension est filtrée (papier filtre ou coton cardé) pour obtenir l'extrait aqueux clarifié.

2. **Réaction colorée :** Dans un tube à essai, un volume de 1 mL de chaque extrait glucidique de poudre de châtaigne (fermentée ou non) est mélangé à 0,25 mL de phénol (5%) et 1,5 mL d'acide sulfurique concentré.

3. **Incubation :** Après une légère agitation pour homogénéiser le milieu, les tubes sont placés au bain-marie à 60°C pendant 40 minutes. Cette étape permet le développement complet de la coloration jaune-orangée caractéristique.

4. **Mesure :** Après refroidissement des tubes à température ambiante, l'absorbance est mesurée à 490 nm contre un blanc de gamme.

- ✓ **Préparation de la courbe d'étalonnage et expression des résultats**

La quantification est effectuée par report des absorbances sur une courbe d'étalonnage réalisée avec du glucose pur. La gamme étalon a été préparée à partir d'une solution mère de glucose à 0,5 g/L (25mg/50 mL d'eau distillée), diluée pour obtenir différentes concentrations de référence. Les résultats sont exprimés en g/100g.

4.9. Détermination des sucres réducteurs

Principe

La quantification des sucres réducteurs (glucose, fructose, maltose, etc.) repose sur la méthode colorimétrique de Miller (1959) au réactif à l'acide 3,5-dinitrosalicylique (DNS). En milieu alcalin et à chaud, les sucres possédant une fonction carbonyle libre réduisent le DNS (jaune) en acide 3-amino-5-nitrosalicylique (brun-orangé). L'intensité de la coloration, proportionnelle à

la concentration en sucres réducteurs, est mesurée par spectrophotométrie à une longueur d'onde de 540nm.

✓ **Mode opératoire**

1. Dosage colorimétrique

Dans un tube à essai, un volume de 1mL d'extrait est mélangé à 1mL de réactif DNS. Après homogénéisation, les tubes sont placés au bain-marie bouillant marie à 100°C, pendant 10 min afin de développer la réaction colorée. Après refroidissement rapide à température ambiante, l'absorbance est lue à 540 nm contre un blanc de gamme (eau distillée + DNS). La concentration en sucres réducteurs est calculée à partir de l'équation de la courbe d'étalonnage.

2. Courbe d'étalonnage et expression des résultats

Une gamme étalon est préalablement réalisée à partir d'une solution mère de glucose à 2g/L. La concentration en sucres réducteurs des échantillons est déterminée par rapport de l'absorbance sur la courbe d'étalonnage (y = ax + b) et exprimée en milligrammes d'équivalent glucose par gramme de matière sèche (m Eq Glu/g de MS).

5. Détermination des propriétés techno fonctionnelles

5.1. Détermination de la capacité de rétention d'eau

La capacité de rétention d'eau (CRE) des farines de châtaigne a été quantifiée selon la méthode de (Badia-Olmos *et al.*, 2023). Une quantité de **1 g** de chaque échantillon a été mélangée à **10 mL** d'eau distillée.

Les suspensions résultantes ont été vortexées pendant 30 secs puis laissées au repos pendant 2h à température ambiante (25C°). Les suspensions ont ensuite été centrifugées pendant 10 min à 4000rpm (à l'aide d'une centrifugeuse *SIGMA 2-6,* Allemagne). Le précipité a été séché à 100 °C et la CRE a été calculée comme suit :

$$CRE = \frac{mph - mps}{me}$$

Où :

- **mph :** masse du précipité humide.
- **mps :** masse du précipité séché.
- **me :** masse de l'échantillon.

5.2. Capacité de rétention d'huile

La capacité de rétention d'huile (CRH) des farines a été déterminée selon la méthode décrite par Badia-Olmos *et al*. (2023). Pour cela, **1 g** de chaque échantillon de farine a été mélangé à 10 mL d'huile à l'aide d'un mélangeur vortex. Les échantillons ont ensuite été laissés au repos à température ambiante (22 ± 2 °C) pendant 1 h avant d'être centrifugés à 4000 tr/min pendant 10 min. L'excès d'huile a été décanté en retournant les tubes sur du papier absorbant, et les échantillons ont été laissés égoutter. La CRH a été calculée comme suit :

$$CRH(\frac{g}{g}) = \frac{me - me_0}{me_0}$$

- m_e **:** masse de l'échantillon, y compris l'huile retenue (g).
- m_{e0} **:** masse de l'échantillon initial (g).

5.3. Capacité de gonflement

La capacité de gonflement (CG) a été déterminée selon la méthode d'Alam *et al*. (2023), avec de légères modifications. Une quantité de 10 g de farine a été pesée et ajoutée à un cylindre gradué de 100 mL. De l'eau distillée a ensuite été ajoutée pour atteindre un volume total de 30 mL, et le mélange a été agité soigneusement. Après 20 h, le volume final de l'échantillon a été mesuré et la CG a été calculé selon la formule suivante :

$$CG(\%) = \frac{(Vf - Vi)}{Vi} \times 100$$

Où :

- **Vi :** le volume de l'échantillon (mL) à 0 min.
- **Vf :** le volume de l'échantillon après 20 h (mL).

5.4. Capacité émulsifiante

La capacité émulsifiante (CE) des farines de châtaigne a été déterminée suivant la méthode décrite par Badia-Olmos *et al*. (2023).

- ✓ **Mode opératoire**

Un échantillon de 1 g de poudre de châtaigne a été mélangé avec 20 mL d'eau distillée et 20 mL d'huile de tournesol. Ce mélange a ensuite été émulsifié à l'aide d'un homogénéisateur fonctionnant à 9500 tr/min pendant 1 min. Par la suite, il a été soumis à une centrifugation à 3000× g pendant 5 min à température ambiante.

- ✓ **Expression des résultats**

La capacité émulsifiante est calculée avec la formule suivante :

$$CE(\%) = \frac{HCEM}{HCEN} \times 100$$

Où :

- **HCEM :** hauteur de la couche d'émulsion (mm).
- **HCEN :** hauteur de la couche entière (mm).

6. Détermination des propriétés antioxydantes

6.1 Extraction

L'extraction des composés polyphénoliques libres et conjugués à partir des farines de châtaigne fermentée et non fermentée a été réalisée par macération hydro-alcoolique, selon un protocole adapté de la littérature. **(**Barros *et al.*,2010).

Une masse de **5 g** de poudre de châtaigne, préalablement séchées et finement broyées, a été mise en contact avec 50 mL de solvant préparé (éthanol/eau : 80 :20).

Le mélange a été incubé à température ambiante pendant 24 heures, avec une agitation initiale de 2 heures afin d'assurer une homogénéisation efficace et de favoriser la solubilisation des composés phénoliques.

À l'issue de la macération, l'extrait a été centrifugé pendant 15 minutes, puis le surnageant a été filtré à l'aide d'un papier filtre afin d'éliminer les résidus solides. L'extrait éthanolique obtenu a été utilisé directement, sans évaporation préalable du solvant, pour le dosage des composés phénoliques totaux, des flavonoïdes et pour l'évaluation de l'activité antioxydante par le test DPPH.

Avant analyse, l'extrait brut a été dilué de manière appropriée afin de rester dans la zone de linéarité des méthodes spectrophotométriques employées. Les résultats ont été exprimés par rapport à la matière sèche initiale, en tenant compte du volume total d'extraction et des facteurs de dilution. Les extraits ont été conservés à 4 °C, à l'abri de la lumière, et analysés dans un délai court afin de limiter toute dégradation oxydative.

6.2. Dosage des polyphénols totaux

La teneur en polyphénols totaux est habituellement déterminée avec le spectrophotomètre UV-Vis grâce à la méthode de Folin-Ciocalteu décrite par Singleton et Rossi (1965). Brièvement, 0,3 mL de chaque extrait sont ajoutés à 1,5 mL de réactif de Folin-Ciocalteu 10 fois dilué. Les solutions sont mélangées et incubées pendant 4 minutes. Après l'incubation, 1,2 mL de la solution de carbonate de sodium Na_2CO_3 (7,5 %) sont ajoutés. Le mélange final est secoué et puis incubé pendant 2 heures dans l'obscurité à température ambiante.

L'absorbance de tous les extraits est mesurée par un spectrophotomètre à 765 nm. Une courbe d'étalonnage est réalisée en parallèle dans les mêmes conditions opératoires en utilisant l'acide gallique à différentes concentrations (15,62–200 µg/mL).

Toutes les mesures ont été effectuées en triplicate. La concentration des polyphénols est calculée à partir de la droite d'étalonnage établie avec l'acide gallique. Les résultats sont exprimés en milligrammes d'équivalents d'acide gallique par gramme de matière sèche (mg EAG/g m.s).

6.3. Dosage des flavonoïdes totaux

Les flavonoïdes donnent avec le chlorure d'aluminium des complexes chromogènes de couleur jaune, coloration dont l'intensité est mesurable à un spectrophotomètre à UV 430 nm (Donzo et *al.*, 2015).

La teneur en flavonoïdes totaux est déterminée par une méthode colorimétrique décrite par Serra *et al.*, (2001).

1 mL de chlorure d'aluminium ($AlCl_3$ à 2%) est additionné à 1 ml d'extrait. Après 15 mn d'incubation à l'abri de la lumière, l'absorbance est mesurée à 430 nm. Les résultats ont été exprimés en mg équivalent de quercétine par gramme de matière sèche (mg EQ/g ms).

6.4. Détermination de l'activité antioxydante par le test DPPH

L'évaluation de la capacité antioxydante des extraits de farines de châtaignes fermentées et non fermentées a été réalisée par le test de DPPH

✓ **Principe**

Le composé chimique 2,2diphényl-1- picrylhydrazyl (α,α-diphényl-β-picrylhydrazyle) fut l'un des premiers radicaux libres utilisé pour étudier la relation structure- activité antioxydant des composés phénoliques. Du fait que ce composé possède un électron non apparié sur un atome du pont d'azote, les molécules du radical ne forme pas des dimères il reste donc sous sa forme monomère relativement stable à température ambiante. C'est cette délocalisation qui provoque la coloration violette foncé bien caractéristique de la solution de DPPH. Mesurer la diminution de la coloration de DPPH permet de mesurer l'efficacité d'un antioxydant, due à une recombinaison des radicaux DPPH qui possède une absorbance maximum à 515 nm.

Concernant les composés phénoliques, le mécanisme principal d'action est le piégeage des radicaux libres par transfert de l'atome H sur le DPPH° alors transformé en une molécule stable DPPH **(**Popovici *et al.,* 2010) Les résultats peuvent être exprimés en tant qu'activité anti-radicalaire ou en pourcentage d'inhibition des radicaux libres

✓ **Préparation de la solution DPPH**

Dissoudre 4mg de DPPH dans 100mL éthanol (couvrir la solution avec l'aluminium)

✓ **Mode opératoire**

- Ajouter 100 µL d'extrait d'échantillon, puis mélanger avec 2 mL de solution de DPPH à 0,1 mm (faire 3 répétitions), Agiter pendant 10 secondes, puis conserver à l'obscurité à température ambiante pendant 30 minutes.
- Mesurer l'absorbance à 517 nm au spectrophotomètre contre un blanc contenant uniquement le solvant (2mL éthanol).
- Pour l'échantillon contrôle Utiliser 2ml solution de DPPH et 100uL éthanol à la place de l'extrait et enregistrer l'absorbance comme blanc.

- Témoin positif : Acide Ascorbique (Vitamine C)
- L'acide ascorbique sert de référence pour calculer la capacité antioxydante relative.
- Solution stock (1 mg/ml) **:** Dissoudre 10 mg d'acide ascorbique dans 10 ml d'éthanol.
- Le pourcentage d'inhibition (I %) a été calculé selon l'équation suivante :

$$\boldsymbol{I}(\%) = \frac{(\boldsymbol{Abs\ blanc\ - Abs\ échantillon})}{\boldsymbol{Abs\ blanc}} \times \mathbf{100}$$

Où :

- **Abs blanc :** absorbance du blanc (DPPH dans le méthanol).
- **Abs échantillon :** absorbance de l'échantillon.

Un échantillon de contrôle a été préparé en l'absence d'extrait et soumis aux mêmes conditions expérimentales. L'acide ascorbique a servi d'antioxydant standard.

7. Préparation des Biscuits sans gluten

Les biscuits sans gluten ont été élaborés selon une méthode adaptée de la procédure AACC 10-50D, avec quelques modifications. La formulation de base a été établie à partir d'un mélange témoin composé de farine de riz et de farine de maïs, conformément aux approches utilisées dans l'optimisation des produits boulangers sans gluten décrites par Ferradji *et al.* (2024).

7.1. Formulations expérimentales

Le mélange témoin était constitué de 50 g de farine de riz et de 50 g de farine de maïs (100 g de farines au total). L'enrichissement a été réalisé par substitution partielle de ce mélange de base par de la farine de châtaigne non fermentée (FCNF) ou fermentée (FCF) à des taux de 30 %, 50 % et 80 % (m/m). Le choix de cette substitution repose sur des données bibliographiques montrant que l'incorporation de farines issues de matrices végétales alternatives telles que la châtaigne, est adaptée aux formulations de produits sans gluten **(**Jan and Panesar, 2018; Mohammadi *et al.*, 2022; Ferradji *et al.*, 2024**).** Ces substitutions permettent non seulement de répondre aux exigences liées à l'intolérance au gluten, mais également d'améliorer la valeur nutritionnelle, fonctionnelle et antioxydante des produits finis.

Ainsi, sept formulations ont été étudiées: une formulation témoin, trois formulations enrichies en farine de châtaigne non fermentée (FCNF30, FCNF50 et FCNF80) et trois formulations enrichies en farine de châtaigne fermentée (FCF30, FCF50 et FCF80).

7.2. Procédé de fabrication des biscuits

Pour garantir la reproductibilité, toutes les formulations ont été préparées selon le protocole séquentiel suivant :

- **Mélange initial :** Consiste à mélanger manuellement l'ensemble des ingrédients (sucre, œuf entier, levure chimique, sel et eau distillée) avec le mélange de farines.
- **Incorporation et Pétrissage :** Ajouter les 50 g de margarine au mélange. La pâte obtenue est ensuite pétrie à l'aide d'un batteur électrique (Promis Star, Modèle Prep'Line 200) pendant trois minutes à vitesse constante, jusqu'à l'obtention d'une texture homogène.
- **Repos de la pâte :** Laisser reposer la pâte obtenue pendant cinq (05) minutes sur les plaques de cuisson à température ambiante.
- **Laminage et Mises en forme :** La pâte est laminée à une épaisseur uniforme comprise entre 4 et 5 mm, puis découpée à l'aide d'un emporte-pièce circulaire de 6 cm de diamètre.
- **Cuisson :** Enfourner les biscuits dans un four électrique préchauffé à 200 °C pendant 10 minutes.
- **Refroidissement et Conditionnement :** Après la cuisson, les biscuits sont refroidis à température ambiante (à l'air libre) avant d'être manipulés, puis emballés dans des sachets étanches pour les protéger de l'humidité jusqu'au moment des analyses.

Les formulations enrichies en FCNF et en FCF ont été préparées en suivant strictement le même procédé technologique et les mêmes conditions de fabrication que la formulation témoin, à l'exception de la nature de la farine substituée. Cette approche expérimentale permet d'évaluer spécifiquement l'impact de la fermentation de la farine de châtaigne sur les propriétés physico-chimiques, fonctionnelles et sensorielles des biscuits sans gluten.

8. Analyse sensorielle du biscuit

La qualité sensorielle des biscuits sans gluten enrichies en farine de châtaignes fermentées et non fermentées a été évaluée à l'aide de tests sensoriels tel que décrit par Watts *et al*. (1991). L'acceptabilité des différents échantillons a été déterminée au moyen d'un test hédonique utilisant

une échelle à neuf points, largement employée dans les études d'évaluation sensorielle des produits alimentaires (Mudgil *et al.* 2017).

Les dégustateurs ont évalué plusieurs attributs sensoriels, à savoir l'apparence, la couleur, l'odeur, la texture, le goût ainsi que l'acceptabilité globale et l'intensité d'achat. Pour chaque attribut, une note comprise entre 1 et 9 a été attribuée selon le degré d'appréciation du produit, où 1 correspond à « n'aime extrêmement pas », 5 à « ni aime ni n'aime », et 9 à « aime extrêmement ».

8.1. Constitution du jury de dégustation

L'acceptabilité sensorielle des biscuits a été évaluée par un panel de quarante-cinq (45) sujets, âgés de 18 à 24 ans. Le jury était principalement composé d'étudiants en fin de cycle du Département des Sciences Agronomiques (Université 20 Août 1955 de Skikda, Algérie). Ces dégustateurs ont été sélectionnés pour leur état de santé général, leur hygiène dentaire et leur statut de non-fumeurs. De par leur formation académique, ils possédaient une initiation préalable à l'analyse sensorielle, complétée par une séance de formation spécifique pour harmoniser la compréhension des attributs évalués.

8.2. Conditions expérimentales

La séance de dégustation s'est déroulée à 10h30, un créneau horaire choisi pour limiter l'influence de facteurs critiques tels que la fatigue, le stress, la faim ou la satiété. Les tests ont été réalisés dans une salle préparée à cet effet, où chaque juré occupait une table individuelle afin de garantir l'indépendance des jugements. La durée totale de la séance a été d'environ 30 minutes.

Chaque dégustateur a reçu sept échantillons de biscuits, comprenant un biscuit témoin et des biscuits enrichis à différents taux de farine de châtaigne fermentée et non fermentée. Les participants ont ensuite complété une fiche d'évaluation sensorielle portant sur les différents attributs étudiés.

Un test de préférence par classement a également été réalisé. Les dégustateurs ont été invités à classer les échantillons du plus apprécié au moins apprécié afin d'identifier les formulations les mieux acceptées.

Les données recueillies ont été exprimées sous forme de moyennes ± écarts-types. Les résultats ont été soumis à une analyse de variance (ANOVA) à un facteur.

9. Évaluation de la qualité des biscuits sans gluten

9.1. Volume spécifique

Le volume spécifique des biscuits (cm^3/g) a été déterminé selon la méthode AACC 10-05 (AACC, 2000), fondée sur le principe du déplacement des graines. Cette mesure permet d'évaluer le développement du produit ainsi que sa structure interne après cuisson.

Chaque biscuit a été pesé à l'aide d'une balance analytique, puis son volume a été déterminé par déplacement de volume dans un récipient gradué contenant un matériau granulaire. Le volume déplacé, correspondant au volume du biscuit, a été mesuré à l'aide d'une éprouvette graduée. Le volume spécifique a ensuite été calculé en rapportant le volume du biscuit à sa masse selon l'équation suivante :

$$\textbf{Volume spécifique } \left(\frac{\textbf{cm3}}{\textbf{g}}\right) = \textbf{V(cm3)/m (g)}$$

Où :

v : volume de l'excès de graines (cm^3)

m : masse du biscuit (g)

9.2. Facteur d'expansion

Le facteur d'expansion a été déterminé conformément à la méthode AACC 10.05 AACC, 2000), en rapportant le diamètre du biscuit avant cuisson à celui mesuré après cuisson, à l'aide d'un pied à coulisse (± 0,01 mm).

$$\textbf{Facteur d'expansion} = \frac{\textbf{Diamètre avant cuisson}}{\textbf{Diamètre après cuisson}}$$

Ce paramètre permet d'évaluer l'effet de l'enrichissement en farine de châtaigne fermentée ou non fermentée sur le développement du biscuit à la cuisson.

9.3. Teneur en humidité

La teneur en humidité des biscuits a été déterminée selon la méthode **ICC 110/1**, reposant sur le séchage à l'étuve jusqu'à masse constante.

9.4. Analyse de la couleur

La couleur des biscuits a été analysée selon la méthode décrite par Djeghim *et al*. (2021) à l'aide de l'application Color Grab (version 3.6.1, Loomatix Ltd., Munich, Allemagne).

Afin de garantir des conditions d'éclairage standardisées et reproductibles lors des mesures de couleur, les échantillons ont été placés dans un caisson photographique fermé (39 × 17 × 28 cm) équipé d'une source lumineuse LED blanche (1,2 W ; 5 V). Ce dispositif a permis d'assurer un éclairage homogène tout en limitant les variations liées à la lumière extérieure.

Les paramètres colorimétriques ont été exprimés dans l'espace **CIE L*a*b***, où :

- **L*** représente la luminosité (0 = noir, 100 = blanc),
- **a*** varie du vert (–) au rouge (+),
- **b*** varie du bleu (–) au jaune (+).

Cinq points distincts ont été mesurés sur la surface de chaque biscuit afin d'obtenir une valeur moyenne représentative.

10. Analyse statistique

Les résultats présentés dans ce travail correspondent à la moyenne de trois répétitions indépendantes (n=3). Les données sont exprimées sous la forme de moyenne ± écart-type**.** Le traitement initial des données a été effectué sur le Microsoft Excel (2013).

L'analyse statistique des résultats a été réalisée à l'aide du logiciel XLSTAT (version 2026.28.1.0, Addinsoft) selon les approches suivantes :

- **Comparaison des farines :** Les différences entre les paramètres physico-chimiques et technologiques des farines de châtaigne (fermentée vs non fermentée) ont été évaluées par un **test *t* de Student** pour échantillons indépendants.
- **Analyse sensorielle :** Les scores issus de l'évaluation sensorielle des biscuits ont été soumis à une analyse de variance (ANOVA) à un facteur, complétée par le test de comparaison multiple de Tukey (HSD).

Pour l'ensemble des tests, les différences ont été considérées comme statistiquement significatives pour une valeur de $p < 0,05$.

1. Caractéristiques physicochimiques des farines des châtaignes fermentées et non fermentée

Les caractéristiques physicochimiques des farines de châtaigne fermentée (F) et non fermentée (NF) ont fait l'objet d'une analyse comparative. Les résultats obtenus mettent en évidence des différences statistiquement significatives ($p \leq 0,05$) entre les deux types de farine.

1.1. PH

Les résultats obtenus mettent en évidence une diminution significative du pH de la farine de châtaigne au cours de la fermentation. Avant l'ensemencement, la farine non fermentée présentait un pH de 6,4, tandis que la farine destinée à la fermentation affichait un pH initial de 6,3, indiquant des conditions de départ comparables. Après 24 heures de fermentation, le pH de la farine fermentée a diminué jusqu'à 4,8, révélant une acidification marquée.

La diminution significative du pH observée après la fermentation de la farine de châtaigne traduit l'activité métabolique intense de *Lactobacillus plantarum.* Cette bactérie lactique utilise les glucides fermentescibles présents dans la matrice comme source de carbone et d'énergie, conduisant à la production d'acides organiques, principalement l'acide lactique, mais également de faibles quantités d'acide acétique et d'autres métabolites organiques (Petrova and Petrov, 2020**).** L'accumulation de ces composés entraîne une acidification progressive du milieu, comme en affirme la baisse du pH de 6,3 à 4,8 après 24 heures de fermentation.

Cette acidification constitue un indicateur majeur de la réussite du processus fermentaire et contribue à l'amélioration de la stabilité microbiologique du substrat en limitant le développement des microorganismes d'altération et potentiellement pathogènes. Par ailleurs, la diminution du pH favorise l'activation de certaines enzymes endogènes et microbiennes impliquées dans l'hydrolyse de composés complexes, ce qui peut améliorer la biodisponibilité de plusieurs nutriments et composés bioactifs (Achi and Asamudo, 2019).

Les résultats obtenus sont en accord avec ceux rapportés par Gernah *et al*. (2011) et Ojokoh et Bello (2014), qui ont observé une diminution significative du pH lors de la fermentation de matrices végétales, attribuée à la dégradation des glucides et à la production d'acides organiques par les bactéries lactiques. Des observations similaires ont également été rapportées lors de la fermentation de céréales et de pseudo-céréales, notamment le maïs (*Zea mays*), le mil (*Pennisetum glaucum*) et le sorgho, où l'acidification du milieu résulte de l'utilisation des sucres fermentescibles

et de la transformation biochimique de macromolécules telles que les protéines, les polysaccharides et certains composés lipidiques (Bilgiçli *et al.,* 2006 ; Petrova and Petrov, 2020 ; Adebo *et al.,* 2022).

Dans le cas de la farine de châtaigne, la diminution du pH observée confirme donc l'efficacité de la fermentation lactique et suggère des modifications biochimiques susceptibles d'améliorer son potentiel en tant qu'ingrédient fonctionnel destiné à la formulation de produits sans gluten.

1.2. Acidité Titrable

L'acidité des matrices alimentaires constitue un indicateur global des transformations biochimiques survenant au cours des procédés de fermentation et de stockage. Elle reflète principalement l'accumulation de composés acides issus de différentes voies métaboliques, incluant la fermentation des glucides, l'hydrolyse des lipides et, dans une moindre mesure, la dégradation des protéines (Verni *et al.,* 2019).

Concernant l'acidité, les résultats mettent en évidence une différence statistiquement significative entre les deux types de poudres étudiées. La poudre non fermentée présente une valeur d'acidité plus faible (0,7 ± 0,10), tandis que la poudre fermentée, obtenue par fermentation contrôlée à l'aide de Lactobacillus plantarum, affiche une augmentation notable (1,40 ± 0,10). Cette évolution traduit l'impact direct du processus fermentaire sur les propriétés biochimiques de la matrice.

Cette augmentation de l'acidité s'explique principalement par l'activité métabolique de *L. plantarum*, qui assure la fermentation des sucres fermentescibles présents dans la farine, conduisant à la production d'acides organiques, notamment l'acide lactique et, dans une moindre proportion, l'acide acétique. Parallèlement, des réactions enzymatiques secondaires, telles que l'hydrolyse des triglycérides, peuvent contribuer à la libération d'acides gras libres, participant ainsi à l'augmentation de l'acidité mesurable (Coda *et al.,* 2014 ; Verni *et al.,* 2019).

L'ensemble de ces mécanismes induit une acidification progressive du milieu, résultant de l'accumulation d'acides organiques issus du métabolisme glucidique et de la dégradation partielle des fractions lipidiques et glucidiques, expliquant ainsi l'augmentation globale de l'acidité du produit (Guetarni *et al.* 2024).

Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par Sabater *et al*. (2024), qui ont observé une acidification marquée lors de la fermentation de farines de légumineuses, caractérisée par une diminution significative du pH de 6,4 à 3,75. Ainsi, les résultats obtenus dans la présente étude confirment que la fermentation par *Lactobacillus plantarum* constitue un facteur déterminant dans la modulation de l'acidité des matrices alimentaires. Toutefois, l'amplitude de cette variation peut être influencée par la composition initiale de la matière première ainsi que par les conditions technologiques de fermentation appliquées.

1.3. Humidité (teneur en eau)

La teneur en humidité (%) constitue l'un des paramètres physicochimiques déterminants pour la conservation et la stabilité des poudres végétales. Elle influence directement l'activité de l'eau (a_v), laquelle conditionne les principaux mécanismes de dégradation, notamment les réactions enzymatiques, chimiques et la croissance microbienne (Fellows, 2017 ; Barbosa-Cánovas *et al.*, 2020 ; Rahman, 2021). Selon les normes internationales, une teneur en humidité inférieure à 10–12 % est généralement recommandée pour les farines et poudres végétales afin d'assurer leur stabilité microbiologique et chimique durant le stockage (FAO/WHO, 2019 ; AOAC, 2016).

Dans la présente étude, la farine de châtaigne non fermentée (FCNF) présente une teneur en humidité de 8,82 ± 0,02 %, contre 8,72 ± 0,04 % pour la farine fermentée (FCF). L'analyse statistique ne révèle aucune différence significative entre les deux échantillons ($p > 0,05$), indiquant que la fermentation n'a pas affecté de manière notable la teneur en eau des matrices étudiées.

Ces résultats suggèrent que les conditions de fermentation appliquées n'ont pas induit de variations hydriques mesurables, ce qui peut s'expliquer par la nature solide de la matrice et par l'équilibre hygroscopique des poudres au cours du procédé. Ainsi, la stabilité de l'humidité observée constitue un indicateur favorable pour la conservation des farines fermentées, en limitant les risques de dégradation microbienne et physicochimique au cours du stockage.

Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par Dhen *et al*. (2016) sur des farines de légumineuses fermentées, qui ont observé l'absence de variations significatives de la teneur en eau après fermentation solide. Les auteurs attribuent ce comportement à l'étape de séchage contrôlé appliquée après fermentation, permettant d'homogénéiser et de stabiliser l'humidité des échantillons.

Par ailleurs, les valeurs obtenues dans la présente étude sont comparables à celles décrites dans la littérature pour des farines similaires. En effet, Correia *et al*. (2012) ont rapporté des teneurs en humidité comprises entre 8,5 et 9,2 % pour différentes variétés de farine de châtaigne (Castanea sativa Mill.), tandis que Demiate *et al*. (2001) ont observé des valeurs variant de 7,8 à 10,3 % selon les conditions de séchage et de mouture.

Ces comparaisons confirment que les farines étudiées s'inscrivent dans les gammes de valeurs habituellement rapportées pour ce type de matrice végétale, témoignant de la cohérence technologique des procédés appliqués.

1.4. Teneur en Cendres

La teneur en cendres de la farine de châtaigne non fermentée (FNF) est de 2,60 ± 0,10 %, traduisant une richesse minérale relativement élevée de cette matrice végétale (*Castanea sativa* Mill.). Cette valeur se situe dans la limite supérieure des teneurs généralement rapportées dans la littérature. À titre de comparaison, Massantini *et al.* (2021) indiquent que la teneur en cendres des farines de châtaigne varie généralement entre 1,80 % et 2,50 %, en fonction de la variété ainsi que des conditions de transformation, notamment les procédés de séchage et de décorticage.

Cette teneur élevée peut être attribuée à la composition intrinsèque de la châtaigne, reconnue pour sa richesse en éléments minéraux essentiels tels que le potassium, le phosphore, le magnésium et le calcium (Borges *et al.,* 2008). Les écarts observés entre les différentes études peuvent être liés à plusieurs facteurs, notamment la variété cultivée, l'origine géographique des fruits, les conditions pédoclimatiques ainsi que les pratiques culturales. Par ailleurs, Correia *et al.* (2009) ont montré que les conditions de transformation, en particulier les paramètres de séchage, influencent significativement la composition chimique des farines de châtaigne. La teneur en cendres observée dans la présente étude pourrait ainsi résulter à la fois des caractéristiques de la matière première et des conditions technologiques appliquées lors de la préparation de la farine.

Après fermentation par *Lactobacillus plantarum,* la teneur en cendres diminue significativement pour atteindre 2,22 ± 0,13 %. Cette diminution pourrait résulter de la solubilisation de certains composés minéraux au cours de la fermentation, favorisant leur diffusion vers le milieu environnant. Par ailleurs, l'activité métabolique de *Lactobacillus plantarum* peut entraîner une mobilisation partielle de certains éléments minéraux nécessaires à la croissance

microbienne. Les échanges entre la matrice solide et la phase liquide durant le procédé fermentaire peuvent également contribuer au lessivage des sels minéraux hydrosolubles, ce qui se traduit par une réduction de la teneur en cendres mesurée dans la farine fermentée.

Ces observations concordent avec celles d'Adebiyi *et al*. (2017), qui ont rapporté une diminution de la teneur en cendres après fermentation et maltage de céréales, attribuée principalement à la perte de minéraux hydrosolubles au cours des différentes étapes technologiques. De même, Mudau *et al*. (2022) ont mis en évidence une réduction progressive de la teneur en cendres avec l'augmentation de la durée de fermentation dans des produits à base de *finger millet*, phénomène associé à la migration des minéraux vers le milieu fermentaire ainsi qu'aux transformations biochimiques induites par l'activité microbienne.

Toutefois, malgré cette diminution, la farine fermentée conserve une teneur en cendres relativement élevée (2,22 %), témoignant de la préservation d'une part importante de sa fraction minérale. Cette observation suggère que la fermentation par *Lactobacillus plantarum* n'entraîne pas de pertes minérales majeures. Au contraire, plusieurs études ont montré que l'acidification du milieu provoquée par les bactéries lactiques favorise l'hydrolyse des complexes phytate-minéraux, augmentant ainsi la solubilité et la biodisponibilité de certains éléments essentiels tels que le fer, le zinc, le calcium et le magnésium (De Pasquale *et al.* 2020). Ainsi, bien que la teneur totale en minéraux soit légèrement réduite, la fermentation pourrait améliorer leur accessibilité nutritionnelle, renforçant l'intérêt de la farine de châtaigne fermentée comme ingrédient fonctionnel dans les formulations alimentaires.

1.5. Teneur de fibre brute

Les résultats mettent en évidence une diminution significative de la teneur en fibres brutes après la fermentation de la farine de châtaigne par *Lactobacillus plantarum*, celle-ci passant de 3,48 ± 0,62 % pour la farine non fermentée (FNF) à 2,63 ± 0,26 % pour la farine fermentée (FF), soit une réduction d'environ 24,5 %.

Cette diminution observée peut être expliquée par les transformations enzymatiques induites par *Lactobacillus plantarum* au cours du processus fermentaire qui est capable de détruire les liaisons hydrogène inter-chaînes de la cellulose et de l'hémicellulose, ainsi que les liaisons β-glycosidiques de la pectine (Liao *et al.,* 2022, entraînant une réduction de la fraction insoluble

mesurée par la méthode de Randall, et conduisant parallèlement à une augmentation de la teneur en fibres solubles, ce qui améliore la digestibilité et les propriétés fonctionnelles de la poudre fermentée.

La teneur en fibres brutes de la farine non fermentée est globalement conforme aux valeurs rapportées dans la littérature pour *Castanea sativa*. En effet, Borges *et al.* (2008) et Gomes-Laranjo *et al*. (2025) indiquent des teneurs variantes entre 4 et 10 % selon le cultivar, tandis que Correia *et al*. (2009) rapportent des valeurs comprises entre 2,20 % et 3,80 %. Les résultats obtenus s'inscrivent ainsi dans ces intervalles, confirmant la cohérence des données expérimentales. Cette fraction fibreuse traduit la richesse naturelle de la matrice en polysaccharides pariétaux, tout en rappelant que les fibres brutes ne représentent qu'une partie des fibres alimentaires totales.

1.6. Teneur en matière grasse

Les matières grasses constituent un paramètre nutritionnel important des farines, puisqu'elles contribuent à leur valeur énergétique, à leurs propriétés technologiques ainsi qu'aux caractéristiques sensorielles des produits finis. La châtaigne (*Castanea sativa* Mill.) est généralement considérée comme un fruit à faible teneur lipidique comparativement aux fruits oléagineux. Selon Borges *et al*. (2008), la teneur en matières grasses des châtaignes varie entre 2,07 % et 4,48 % selon le cultivar. Les résultats obtenus dans la présente étude pour la farine de châtaigne non fermentée (2,74 ± 0,03 %) s'inscrivent donc dans les intervalles habituellement décrits dans la littérature, confirmant la faible teneur lipidique caractéristique de cette matrice végétale.

Après fermentation par *Lactobacillus plantarum*, la teneur en matières grasses diminue légèrement pour atteindre 2,40 ± 0,04 %. Cette réduction peut être attribuée aux transformations biochimiques induites par le processus fermentaire. Bien que *Lactobacillus plantarum* utilise préférentiellement les glucides comme source d'énergie, la fermentation peut favoriser l'hydrolyse partielle des lipides par l'action d'enzymes lipolytiques présentes dans la matrice ou produites par les microorganismes. Cette lipolyse conduit à la libération d'acides gras libres et de glycérol, susceptibles d'être métabolisés ou impliqués dans diverses réactions biochimiques au cours de la fermentation.

Des observations similaires ont été rapportées dans plusieurs matrices végétales fermentées. Mokhtari *et al*. (2020) ont observé une diminution de la teneur en matières grasses lors de la fermentation du blé dur, tandis que Makawi *et al*. (2019) ont mis en évidence une réduction significative de la fraction lipidique après fermentation du sorgho. Selon ces auteurs, cette diminution résulterait principalement de l'intensification des réactions de lipolyse et de la transformation des lipides en composés plus simples au cours du processus fermentaire. Des conclusions comparables ont également été rapportées par Becila *et al*. (2022), qui ont souligné que la fermentation peut modifier le profil lipidique des matrices végétales par dégradation enzymatique des triglycérides.

Malgré cette diminution, les valeurs obtenues avant et après fermentation demeurent relativement proches, indiquant que la fermentation n'a pas entraîné de modification majeure de la fraction lipidique de la farine de châtaigne. Cette stabilité relative suggère que la farine fermentée conserve l'essentiel de ses propriétés nutritionnelles et énergétiques tout en bénéficiant des améliorations fonctionnelles associées à la fermentation.

1.7. Teneur en protéines

La teneur en protéines de la farine de châtaigne non fermentée est de 5,63 ± 0,59 %, une valeur proche de celle rapportée par Hegazy *et al*. (2014) pour *Castanea sativa* Mill. (5,58 %), ce qui confirme la cohérence de nos résultats avec les données de la littérature.

Après fermentation par *Lactobacillus plantarum*, la teneur en protéines augmente significativement ($p < 0,05$) pour atteindre 7,24 ± 0,10 %. Cette augmentation apparente est fréquemment observée dans les matrices végétales fermentées et résulte principalement d'un effet de concentration lié à la consommation des glucides fermentescibles par les bactéries lactiques. La diminution de la fraction glucidique entraîne en effet une augmentation relative de la proportion des protéines dans la matière sèche.

Par ailleurs, la croissance de *Lactobacillus plantarum* au cours de la fermentation s'accompagne de la formation d'une biomasse microbienne riche en protéines cellulaires et en composés azotés, susceptible de contribuer à l'augmentation de l'azote total mesuré dans la matrice. La fermentation favorise également l'hydrolyse partielle des protéines sous l'action d'enzymes protéolytiques microbiennes et endogènes, conduisant à la libération de peptides et

d'acides aminés libres. Ces transformations améliorent généralement la digestibilité des protéines ainsi que leur biodisponibilité.

Les résultats obtenus dans la présente étude sont cohérents avec ceux rapportés pour diverses matrices végétales fermentées, où l'augmentation de la teneur apparente en protéines est principalement attribuée à la consommation des glucides fermentescibles par les microorganismes, entraînant une réduction de la matière organique non azotée et, par conséquent, un effet de concentration de la fraction protéique dans la matière sèche (De Pasquale *et al.*, 2020 ; Adebo *et al.*, 2023). La croissance de *Lactobacillus plantarum* contribue également à l'enrichissement de la matrice en biomasse microbienne riche en protéines cellulaires et en composés azotés. Par ailleurs, l'activité protéolytique développée au cours de la fermentation favorise l'hydrolyse partielle des protéines en peptides et acides aminés libres, améliorant ainsi leur digestibilité et leur biodisponibilité. Des résultats similaires ont été rapportés par Makawi *et al*. (2019), mettant en évidence une augmentation de la teneur en protéines après fermentation. Cette augmentation est attribuée à l'accroissement de la biomasse microbienne ainsi qu'à la biosynthèse de protéines cellulaires à partir des intermédiaires métaboliques issus de l'activité fermentaire, conformément aux observations de Fadlallah *et al*. (2010). L'évolution de la teneur protéique dépend ainsi de l'équilibre entre les processus de protéolyse et de biosynthèse microbienne, ainsi que des conditions opératoires de fermentation.

1.8. Teneur en sucres totaux

Les sucres totaux représentent l'ensemble des glucides simples et complexes présents dans un aliment. Leur détermination constitue un paramètre important pour l'évaluation de la qualité nutritionnelle et des transformations biochimiques survenant au cours des traitements technologiques et biologiques (Nielsen, 2017).

Les résultats montrent une diminution significative ($p < 0,05$) de la teneur en sucres totaux après fermentation. La teneur passe ainsi de 36,2 g/100 g dans l'échantillon non fermenté à 18 .58 g/100 g après fermentation. Des résultats similaires ont été rapportés par Shi *et al*. (2021), qui ont observé une diminution significative des sucres totaux après fermentation solide de la poudre de Moringa oleifera.

Cette diminution peut être attribuée à l'utilisation des glucides par les microorganismes fermentaires comme principale source de carbone et d'énergie pour leur croissance et leur activité métabolique (Gänzle, 2014). Selon cet auteur, les bactéries lactiques consomment progressivement les sucres disponibles et les convertissent en différents métabolites, notamment les acides organiques.

Par ailleurs, la fermentation par *Lactobacillus plantarum* s'accompagne de transformations enzymatiques des glucides complexes pouvant conduire à la libération de sucres plus simples, mais ces derniers sont ensuite partiellement métabolisés par les microorganismes fermentaires (Filannino *et al.*, 2018). Lorsque leur consommation dépasse leur production, une diminution de la teneur globale en sucres totaux est observée.

Ainsi, la réduction des sucres totaux observée dans la présente étude reflète un équilibre entre l'hydrolyse des polysaccharides et l'utilisation des sucres libérés par la flore fermentaire, phénomène également décrit lors de fermentations impliquant des bactéries lactiques (Filannino *et al.*, 2018).

1.9. Teneur en sucres réducteurs

Les résultats montrent une augmentation significative ($p < 0,05$) de la teneur en sucres réducteurs après fermentation, traduisant une modification profonde du métabolisme glucidique de la matrice. La teneur passe ainsi de 10,28 g/100 g dans l'échantillon non fermenté à 21,69 g/100 g après fermentation. Cette augmentation suggère que les phénomènes d'hydrolyse enzymatique des polysaccharides de réserve, notamment l'amidon, ont prédominé sur la consommation des sucres par les microorganismes fermentaires.

En effet, la fermentation par *Lactobacillus plantarum* favorise la dégradation progressive des glucides complexes en sucres simples tels que le glucose et le maltose, augmentant ainsi la fraction des sucres réducteurs disponibles. Ce phénomène est lié à l'action combinée d'enzymes glycosidiques et à l'acidification du milieu, qui facilite l'accessibilité des substrats glucidiques (Sabater *et al.*, 2024).

Des résultats similaires ont été rapportés par Sáez *et al*. (2023) dans un produit fermenté à base de châtaigne (amazake), où l'augmentation des sucres a été attribuée à l'hydrolyse enzymatique des glucides complexes au cours du processus fermentaire. Ainsi, l'augmentation

observée dans la présente étude reflète un équilibre dynamique entre production de sucres réducteurs par hydrolyse et leur utilisation partielle par la flore fermentaire.

2. Propriétés techno-fonctionnelles des farines de châtaigne fermentée et non fermentée

Les propriétés techno-fonctionnelles constituent des paramètres essentiels pour évaluer le comportement des farines au cours des procédés de transformation alimentaire. Elles résultent d'interactions complexes entre les différents constituants de la matrice, notamment les protéines et l'amidon, qui jouent un rôle déterminant dans l'élaboration des produits alimentaires et dans l'adaptation des formulations aux exigences technologiques spécifiques de chaque application (Alam *et al.*, 2023 ; Badia-Olmos *et al.*, 2024). Ces propriétés influencent directement les caractéristiques des produits finis, telles que la texture, la structure interne, la capacité de rétention d'eau, ainsi que la qualité sensorielle. Dans cette partie, l'effet de la fermentation sur les propriétés techno-fonctionnelles de la farine de châtaigne a été évalué afin d'apprécier les modifications induites par ce procédé biotechnologique.

2.1. Capacité de rétention d'eau

La capacité de rétention d'eau (CRE) constitue une propriété techno-fonctionnelle majeure des farines, puisqu'elle conditionne leur aptitude à absorber et à retenir l'eau au sein de la matrice alimentaire. Ce paramètre influence directement les caractéristiques rhéologiques des pâtes ainsi que la texture, le rendement et la qualité des produits de boulangerie et de biscuiterie sans gluten (Šmidová & Rysová, 2022 ; Alam *et al.*, 2023).

Les résultats révèlent une augmentation significative ($p < 0,05$) de la CRE après fermentation de la farine de châtaigne par *Lactobacillus plantarum*. En effet, la farine non fermentée présente une capacité de rétention d'eau de $1,66 \pm 0,05$ g/g, tandis que celle de la farine fermentée atteint $2,62 \pm 0,13$ g/g. Cette amélioration représente une augmentation d'environ 58 %, traduisant une modification importante des propriétés fonctionnelles de la matrice.

Cette augmentation significative de la capacité de rétention d'eau (CRE) peut être attribuée aux modifications biochimiques et structurales induites par la fermentation de la farine de châtaigne par *Lactobacillus plantarum*. L'activité métabolique du microorganisme provoque une hydrolyse partielle des protéines, des polysaccharides pariétaux et de certaines fibres alimentaires, entraînant une réorganisation de la matrice et une plus grande exposition des groupements hydrophiles capables de fixer l'eau. L'acidification du milieu contribue également à modifier la conformation

des protéines et à accroître l'accessibilité des granules d'amidon, améliorant ainsi les interactions entre l'eau et la matrice alimentaire (Emkani *et al.*, 2022).

Ces résultats concordent avec ceux de Çabuk *et al*. (2018a), qui ont observé une augmentation de la CRE dans une farine enrichie en protéines de pois fermentée par *Lactobacillus plantarum*. De même, Xing *et al*. (2020) ont attribué cette amélioration aux modifications structurales des protéines induites par l'activité protéolytique des bactéries fermentaires. Plus généralement, plusieurs études ont montré que la fermentation des matrices végétales améliore les propriétés hydriques des farines grâce aux transformations microbiennes et enzymatiques (García-Arteaga *et al.*, 2021 ; Sabater *et al.*, 2024).

2.2. Capacité de Rétention d'Huile (CRH)

La capacité de rétention d'huile (CRH) constitue une propriété techno-fonctionnelle importante des farines, car elle influence la texture, la saveur et la qualité sensorielle des produits alimentaires. Cette propriété dépend principalement de la composition de la matrice, notamment de sa teneur en protéines, en fibres et en amidon, ainsi que des traitements technologiques appliqués lors de sa transformation (Ma *et al.*, 2011 ; Vioque *et al.*, 2012).

Les résultats obtenus révèlent une augmentation significative ($p < 0,05$) de la capacité de rétention d'huile après fermentation de la farine de châtaigne. En effet, la farine fermentée présente une CRH de 1,44 ± 0,01 g/g, contre 1,01 ± 0,01 g/g pour la farine non fermentée.

Les résultats obtenus indiquent que la fermentation améliore significativement la capacité de rétention d'huile de la farine de châtaigne. Cette propriété est particulièrement importante sur le plan technologique, car elle favorise la rétention des composés lipidiques responsables de la saveur, de la jutosité et de la texture des produits finis, contribuant ainsi à une meilleure qualité sensorielle (Kinsella & Melachouris, 1976 ; Makawi *et al.*, 2019).

Des observations similaires ont été rapportées dans diverses matrices végétales fermentées, notamment dans une farine enrichie en protéines de pois fermentée par *Lactobacillus plantarum* (Çabuk *et al.*, 2018a) ainsi que dans des farines de pois chiche et de fève fermentées par une culture mixte de *Lactobacillus bulgaricus* et *Streptococcus thermophilus* (Chandra-Hioe *et al.*, 2016), confirmant l'effet favorable de la fermentation sur les propriétés de rétention des lipides.

2.3. Capacité de Gonflement (CG)

Les valeurs de l'indice de gonflement montrent une stabilité entre la farine non fermentée (3,95 ± 0,08) et la farine fermentée (3,99 ± 0,03), sans différence statistiquement significative ($p > 0,05$), indiquant que la fermentation n'a pas modifié de manière notable cette propriété fonctionnelle.

D'un point de vue technologique, un indice de gonflement élevé est généralement associé à une meilleure aptitude des farines à former des systèmes hydratés adaptés aux formulations alimentaires aqueuses (Alam *et al.,* 2023), tandis qu'une valeur plus faible est parfois recherchée pour des produits spécifiques, notamment les formulations destinées aux nourrissons (Mudau *et al.*, 2022). Cependant, contrairement aux tendances rapportées dans la littérature où la fermentation entraîne souvent une diminution des capacités de rétention d'eau et de gonflement en raison de modifications de l'amidon et des protéines (Alam *et al*., 2023 ; Badia-Olmos *et al*., 2023), nos résultats montrent une stabilité de ce paramètre.

Cette absence de variation suggère que, dans les conditions de fermentation appliquées, les modifications structurales induites sur la matrice de châtaigne sont insuffisantes pour altérer significativement l'organisation des fractions amylacées et protéiques responsables du gonflement. Ainsi, la farine fermentée conserve un comportement hydratation comparable à celui de la farine non fermentée, ce qui peut être considéré comme un avantage technologique pour des applications nécessitant une stabilité fonctionnelle.

2.4. Pouvoir émulsifiant

La capacité émulsifiante (CE) correspond à l'aptitude des protéines ou des composés amphiphiles à former et stabiliser une émulsion huile-eau. Elle constitue une propriété fonctionnelle déterminante dans les matrices alimentaires, en particulier pour la cohésion des pâtes et l'homogénéité texturale des produits de boulangerie et de biscuiterie sans gluten (García-Arteaga *et al.,* 2021).

Les résultats obtenus révèlent une diminution significative ($p < 0,05$) de la CE après fermentation de la farine de châtaigne. La valeur passe de 16,57 ± 0,35 % pour la farine non fermentée à 8,96 ± 0,07 % pour la farine fermentée, parallèlement à une baisse du pH de 6,43 à

4,87. Cette réduction importante traduit une altération des propriétés fonctionnelles des protéines sous l'effet de la fermentation lactique.

Cette diminution peut être attribuée aux modifications structurales induites par l'acidification du milieu. La proximité du point isoélectrique entraîne une réduction de la charge nette des protéines, favorisant la rupture des interactions électrostatiques et hydrogène, ainsi qu'une diminution de leur solubilité et une tendance accrue à l'agrégation (Çabuk *et al.,* 2018a). Par ailleurs, la protéolyse induite par *Lactobacillus plantarum* génère des peptides de plus faible masse moléculaire dont l'organisation structurale limite l'exposition adéquate des domaines amphiphiles nécessaires à la stabilisation des interfaces huile–eau. Ces modifications réduisent ainsi la capacité des protéines à migrer et à former un film interfacial stable autour des gouttelettes lipidiques (Erem & Kilic-Akyilmaz, 2024).

Ces observations concordent avec les résultats rapportés dans diverses matrices végétales fermentées, où une diminution de la capacité émulsifiante est généralement associée à l'acidification et à la déstructuration partielle des protéines (García-Arteaga *et al.,* 2021 ; Çabuk *et al.,* 2018a).

D'un point de vue technologique, cette réduction marquée de la CE suggère que l'utilisation exclusive de la farine fermentée pourrait compromettre la stabilité des systèmes émulsionnés et l'homogénéité texturale des produits finis, en comparaison avec la farine non fermentée.

Dans leur ensemble, ces résultats indiquent que la fermentation induit une restructuration sélective de la farine : elle améliore les propriétés hydrophiles (CRE), maintient la stabilité structurale de l'amidon (CG), tout en diminuant certaines fonctionnalités interraciales des protéines (CE). Cette combinaison de modifications peut être considérée comme technologiquement intéressante pour les produits sans gluten, où l'hydratation et la texture sont recherchées, mais doit être prise en compte pour les systèmes nécessitant une forte stabilité émulsionnante.

3. Composés phénoliques et propriétés antioxydants des farines

À notre connaissance, l'impact spécifique de la fermentation par *Lactobacillus plantarum* sur le profil en composés phénoliques et propriétés antioxydantes de la farine de châtaigne demeure très peu documenté dans la littérature scientifique. Cette lacune bibliographique confère à la présente étude un caractère particulièrement novateur dans le domaine de la valorisation

fonctionnelle, du développement et de la diversification des matrices alimentaires sans gluten à base de châtaigne

3.1. Polyphénols Totaux

Les résultats relatifs aux paramètres antioxydants révèlent une augmentation remarquable et hautement significative ($p < 0,05$) de la teneur en polyphénols totaux après la fermentation de la farine de châtaigne par *Lactobacillus plantarum*. La concentration en composés phénoliques passe en effet de 945 ± 0,003 mg EAG/100g de matière sèche pour la farine non fermentée (FNF) à 1421 ± 0,013 mg EAG/100g de matière sèche pour la farine fermentée (FF).

Cette tendance à l'augmentation des composés phénoliques totaux (PPT) sous l'action de *Lactobacillus Plantarum* s'accorde avec les observations faites sur d'autres matrices végétales. En effet, De Pasquale et al. Ont comparé l'évolution de la teneur en polyphénols totaux (PPT) de plusieurs farines de légumineuses lentilles jaunes et rouges, haricots blancs et noirs, pois chiches et pois fermentées par *Lactobacillus plantarum, Pediococcus acidilactici, Leuconostoc mesenteroides, Limosilactobacillus rossiae et Levilactobacillus brevis.* Leurs travaux ont révélé une hausse systématique des PPT dans les échantillons fermentés par rapport aux matrices initiales non fermentées. Néanmoins, l'ampleur de cet enrichissement variait significativement selon la nature de la légumineuse, les concentrations les plus élevées et les plus faibles ayant été enregistrées respectivement chez le pois chiche et la lentille rouge.

Ce phénomène d'optimisation du profil phénolique par voie fermentaire corrobore également les observations de plusieurs auteurs, notamment lors de la fermentation du lait de soja par Streptococcus thermophilus et Bifidobacterium infantis, qui a conduit à une augmentation significative de la teneur en composés phénolique totaux et à une réduction des facteurs antinutritionnels (Lai *et al.*, 2013), ainsi que lors de la transformation de concentrés protéiques de pois (Çabuk *et al*., 2018b), et de haricots rouges par *Lactobacillus Plantarum*, ou encore au cours de procédés de fermentation naturelle (Limón *et al*., 2015).

Sur le plan mécanistique, il est établi qu'au cours de la fermentation, les enzymes microbiennes hydrolysent les composés phénoliques polymériques complexes, libérant ainsi des structures phénoliques plus simples et dotées d'une activité biologique supérieure (Dueñas *et al*., 2005 ; McCue *et al*., 2005). Par ailleurs, le processus fermentaire induit une dégradation de la matrice lignocellulosique des végétaux, ce qui désorganise le réseau structural et libère les composés

phénoliques initialement piégés dans un état inaccessible. Enfin, ces auteurs soulignent que l'action des polyphénols oxydases contribuerait au clivage des polyphénols complexes en fractions condensées de faible poids moléculaire.

3.2. Teneur en Flavonoïdes Totaux

Les flavonoïdes se distinguent comme le groupe principal de métabolites secondaires végétaux. Grâce à leur pouvoir antioxydant et à leur activité antiradicalaire, ils interviennent de manière déterminante dans la réduction des risques liés aux maladies chroniques (Shen *et al.*, 2022).

L'analyse quantitative révèle que la fermentation par *Lactobacillus plantarum* a induit une élévation substantielle et statistiquement significative ($p < 0,05$) de la teneur en flavonoïdes totaux de la farine de châtaigne. En effet, la concentration est passée de 391,42 mg EC/100g MS pour la farine non fermentée (FNF) à 681,34 mg EC/100g MS pour la farine fermentée , ce qui représente une augmentation relative de 74,06 %.

Sur le plan mécanistique, l'élévation substantielle de la fraction des flavonoïdes totaux s'explique par le potentiel métabolique de *Lactobacillus plantarum*. Cette bactérie lactique possède des activités de type tannase et gallate décarboxylase, capables de catalyser l'hydrolyse des composés phénoliques polymériques complexes et de libérer des aglycones libres, reconnus pour leur solubilité accrue et leur réactivité biologique supérieure (Sabater *et al*., 2024). En outre, le processus fermentaire induit une réduction des tanins et d'autres facteurs antinutritionnels. En désorganisant les liaisons non covalentes au sein des complexes phénol-protéine, la fermentation libère les flavonoïdes qui y étaient séquestrés, optimisant ainsi leur extractibilité et justifiant la forte hausse quantitative observée dans nos essais (Sabater *et al.*, 2024).

Ces conclusions s'accordent avec les travaux récents de Medic *et al*. (2023), confirmant que la biomasse de *Castanea sativa* constitue une source majeure de composés flavonoïques dont la valeur biologique et fonctionnelle peut être efficacement maximisée par la fermentation lactique.

3.3. Pourcentage de piégeage DPPH

Les résultats de l'activité antioxydante des farines de châtaigne (*Castanea sativa* Mill.), déterminés par la méthode de piégeage du radical libre DPPH et exprimés en pourcentage

d'inhibition (PI%) ou de piégeage (PP %). La farine de châtaigne non fermentée (FCNF) affiche un potentiel d'inhibition de 88,790 %, tandis que la farine de châtaigne fermentée (FCF) par *Lactobacillus plantarum* présente une valeur supérieure, atteignant 90,356 %. L'analyse statistique confirme que cette progression est significative ($p < 0,05$).

Sur le plan biochimique, cette augmentation de l'activité met en évidence l'efficacité du traitement biologique par les bactéries lactiques. La fermentation a optimisé la capacité de la matrice à transférer des électrons ou des atomes d'hydrogène vers les molécules cibles, permettant ainsi de neutraliser le radical libre DPPH violet en le convertissant en sa forme réduite stable et décolorée jaune claire (Molyneux, 2004).

Ce gain d'efficacité observé chez la farine fermentée s'explique principalement par une amélioration de la réactivité cinétique au sein de ce système complexe. Les remaniements structurels macromoléculaires induits par l'action de *Lactobacillus plantarum* favorisent une accessibilité accrue des solvants aux sites actifs et aux groupements réducteurs de la matrice, facilitant leur interaction directe avec le radical libre (Kedare et Singh, 2011). À l'inverse, la réactivité plus modérée de la farine non fermentée face au stress oxydatif provoqué in vitro met en exergue les limites structurales de la matrice brute, où de nombreux sites antioxydants restent enfouis ou indisponibles (Othman *et al.*, 2007).

Ces observations s'accordent avec ceux de Ritthibut *et al*. (2022), qui ont mis en évidence une augmentation significative de l'activité de piégeage du radical DPPH après fermentation de l'écorce interne de châtaigne (*Castanea crenata*) par *Monascus kaoliang*.Dans notre étude, ce phénomène suggère que l'hydrolyse enzymatique associée à la fermentation lactique stimule non seulement la libération des phénols complexés, mais favorise également la génération d'autres molécules hautement réductrices. Il peut s'agir de peptides bioactifs issus de la protéolyse ou de sucres réducteurs libres, qui agissent en synergie pour maximiser le potentiel antioxydant global de la farine fermentée.

4. Résultats de l'analyse sensorielle des cookies (Test hédonique)

Le test hédonique permet de mettre en évidence les différences existantes entre le biscuit témoin et les biscuits enrichis en farine de châtaignes non fermentée et fermentée et aussi de définir le profil sensoriel.

Les données recueillies ont fait l'objet d'une analyse statistique afin de déterminer l'effet des formulations sur les différents attributs sensoriels étudiés. Les moyennes obtenues ont été soumises à une analyse de variance (ANOVA) à un facteur, suivie du test de comparaison multiple de Tukey pour la séparation des moyennes lorsque des différences significatives étaient observées. Le seuil de signification statistique a été fixé à $p < 0,05$.

L'analyse sensorielle a révélé un effet significatif des différentes formulations sur la majorité des attributs hédoniques évalués, notamment l'arôme, le goût, la texture en bouche, l'acceptabilité globale ainsi que l'intention d'achat des dégustateurs acteurs ($p < 0,05$). Ces résultats indiquent que l'incorporation de farine de châtaigne, et plus particulièrement son état fermenté ou non fermenté, influence de manière notable la perception sensorielle des biscuits.

4.1. Couleur et aspect visuelle

Toutes les formulations testées se classent sans exception dans le même groupe homogène statistique (a), confirmant l'absence d'effet significatif perçu sur la couleur. La matrice riz-maïs de base assure une excellente stabilité chromatique, et les variations de poudres de châtaigne n'induisent pas de contraste visuel direct suffisant pour rejeter le produit. Des observations similaires ont été rapportées dans la littérature concernant les matrices sans gluten enrichies en farines alternatives, où l'ajout d'ingrédients denses n'entraîne pas systématiquement de modifications négatives perceptibles de la couleur par un panel de dégustateurs (Bourekoua *et al*., 2016).

4.2. Arôme et Profil Volatil

Les résultats révèlent une influence absolument déterminante de la fermentation lactique sur les propriétés organoleptiques aromatiques ($p = 0,007$). La formulation optimisée F50 (F50) présente l'arôme le plus apprécié avec un score maximal de $8,220 \pm 0,271$ (groupe a), alors que le témoin sans gluten (T0) est significativement inférieur avec un score fade de $6,611 \pm 0,289$ (groupe b). Cet effet positif majeur de la fermentation s'explique par la génération intense de composés volatils odorants issus du métabolisme microbien (bactéries lactiques), tels que les alcools supérieurs, les esters fruités, le diacétyle et les acides organiques à chaînes courtes. Ces molécules contribuent à enrichir le profil aromatique avec des notes typiques toastées, beurrées et fruitées extrêmement agréables lors de la cuisson.

Ce phénomène a été largement documenté par Gobbetti *et al.* (2019), qui ont démontré que la fermentation par les bactéries lactiques améliore significativement les qualités organoleptiques des produits céréaliers de cuisson en synthétisant des précurseurs d'arômes volatils.

4.3. Goût et Saveur

Le goût s'est révélé être l'attribut le plus discriminant du panel de dégustation ($p < 0,0001$). La formulation F50 induit le meilleur profil gustatif absolu avec une note d'excellence de 8,463 ± 0,300 (groupe a), suivie de près par la formulation à forte dose F80 (7,805 ± 0,300, groupe ab). À très forte dose (80%), une légère baisse non significative du score est observée, traduisant un léger phénomène de saturation sensorielle ou d'amertume tannique, tandis que le témoin commercial T0 obtient la note la plus faible et médiocre (5,389 ± 0,300, groupe d), illustrant parfaitement la fadeur gustative habituelle des matrices sans gluten non enrichies.

4.4. Texture en Bouche

L'analyse statistique montre un effet hautement significatif des formulations sur la texture croquante ($p < 0,0001$). La formulation F50 se classe seule dans le groupe supérieur (a) avec un score de 7,780 ± 0,309, tandis que le témoin commercial présente le score le plus faible et friable (4,861 ± 0,330, groupe c).

L'incorporation de la farine de châtaigne améliore nettement la texture globale, probablement via l'apport important de fibres hydrophiles fonctionnelles et d'amidon natif modifié thermiquement, qui augmentent le liant structurel et réduisent le caractère sec, sableux et friable du biscuit sans gluten classique. L'optimum textural est atteint à un taux précis de 50% de farine fermentée, l'hydrolyse enzymatique des protéines ayant assoupli la pâte.

4.5. Acceptabilité Globale et Intention d'Achat

La formulation F50 présente les meilleures performances sensorielles absolues de toute l'étude (8,537 ± 0,211 pour l'acceptabilité globale et 8,390 ± 0,300 pour l'intention d'achat), traduisant un équilibre parfait et harmonieux entre les composantes aromatiques, gustatives et texturales.

Ce comportement est parfaitement cohérent avec les travaux de Demirkesen *et al*. (2010) et d'Aguilar *et al.* (2016), qui ont montré que l'incorporation excessive d'ingrédients alternatifs

bruts au-delà de 50% peut entraîner des déséquilibres sensoriels majeurs, notamment en raison d'une intensification excessive de certaines saveurs terreuses, d'une amertume prononcée ou d'une altération de la dureté de la texture. Le test de Tukey confirme que la formulation F50 se situe dans le groupe statistiquement supérieur, tandis que le témoin commercial T0 est significativement rejeté par les dégustateurs.

4.6. Conclusion résultats analyse sensorielle

L'analyse de variance a révélé un effet significatif des formulations sur la majorité des attributs sensoriels étudiés, à l'exception de la couleur. Les résultats montrent que la formulation F50 (50 % de poudre de châtaigne fermentée) présente les meilleures performances en termes d'arôme, de goût, de texture, d'acceptabilité globale et d'intention d'achat. La fermentation apparaît comme un facteur déterminant dans l'amélioration des qualités organoleptiques, tandis que l'effet de la concentration suit une tendance non linéaire avec un optimum à 50 %. À l'inverse, le témoin présente les scores les plus faibles, confirmant l'intérêt de l'incorporation des poudres de châtaigne dans l'optimisation sensorielle des cookies sans gluten.

5. Caractéristiques des biscuits sans gluten enrichis en farines de châtaigne fermentée et non fermentée

5.1. Propriétés physiques biscuits

Les caractéristiques physiques macroscopiques du biscuit témoin (50 % farine de riz – 50 % farine de maïs) et des biscuits enrichis en farine de châtaigne, fermentée ou non fermentée, ont été déterminées après cuisson. L'étude a porté exclusivement sur les formulations présentant la meilleure acceptabilité sensorielle. Cette caractérisation avait pour objectif d'évaluer l'effet de la fermentation par *Lactobacillus plantarum* sur les propriétés physiques des biscuits ainsi que sur le comportement technologique des pâtes lors de la cuisson, en comparaison avec la formulation témoin.

5.1.1. Teneur en humidité finale des biscuits

La teneur en humidité finale constitue un paramètre technologique essentiel, car elle influence directement la texture, notamment le caractère croustillant des biscuits, ainsi que leur stabilité microbiologique et leur aptitude à la conservation. Les résultats montrent que le biscuit formulé avec la farine de châtaigne non fermentée (NF50) présente une teneur en humidité de 6,95

± 0,05 %, légèrement inférieure à celle du biscuit témoin (7,24 ± 0,04 %). En revanche, l'incorporation de farine de châtaigne fermentée (F50) entraîne une diminution plus marquée de l'humidité résiduelle, qui atteint 6,12 ± 0,03 %.

Cette réduction de l'humidité peut être attribuée aux modifications structurales et biochimiques induites par la fermentation. En effet, l'activité métabolique de *Lactobacillus plantarum* provoque une transformation des constituants de la matrice, notamment des protéines et des polysaccharides, entraînant une réorganisation des interactions eau–matrice. Ces changements favorisent une plus grande mobilité de l'eau au cours de la cuisson et, par conséquent, une évaporation plus importante, conduisant à une teneur en humidité finale plus faible (Ammar *et al.*, 2022).

D'un point de vue technologique, cette diminution de l'humidité est susceptible d'améliorer le caractère croustillant du biscuit et de limiter les risques d'altération microbiologique pendant le stockage. Elle constitue ainsi un avantage potentiel pour la qualité et la durée de conservation des produits élaborés à partir de farine de châtaigne fermentée (Dall'Asta *et al.*, 2013).

5.1.2. Volume spécifique (Vsp)

Le volume spécifique constitue un indicateur important de la qualité physique des produits de cuisson, puisqu'il renseigne sur le degré d'expansion de la pâte et sur la structure interne développée au cours de la cuisson. Les résultats obtenus montrent des différences notables entre les formulations étudiées.

L'incorporation de farine de châtaigne non fermentée (NF50) a entraîné une diminution du volume spécifique, qui atteint 1,45 ± 0,04 cm^3/g contre 2,33 ± 0,05 cm^3/g pour le témoin. Cette réduction peut être attribuée à l'absence de gluten dans la farine de châtaigne, limitant la formation d'un réseau protéique capable de retenir efficacement les gaz et de soutenir l'expansion de la pâte pendant la cuisson.

Des observations similaires ont été rapportées par Demirkesen *et al*. (2010), qui ont montré que les formulations sans gluten présentent généralement une structure plus compacte et un volume spécifique plus faible que les produits élaborés à partir de farine de blé.

En revanche, le biscuit formulé avec la farine de châtaigne fermentée (F50) présente une augmentation significative du volume spécifique, atteignant 2,41 ± 0,06 cm^3/g, soit une valeur

légèrement supérieure à celle du témoin. Cette amélioration suggère que la fermentation par *Lactobacillus plantarum* a induit des modifications favorables de la matrice. L'acidification du milieu et l'activité enzymatique associée à la fermentation peuvent entraîner une hydrolyse partielle de certains polysaccharides et protéines, conduisant à une réorganisation de la structure de la pâte et à une amélioration de ses propriétés rhéologiques. Ces transformations favorisent l'expansion du produit lors de la cuisson et limitent l'effondrement de la structure, contribuant ainsi à l'obtention d'un biscuit plus léger et moins dense.

Ces résultats concordent avec les observations de Rizzello *et al.* (2016), qui ont montré que la fermentation lactique des farines sans gluten améliore les caractéristiques technologiques des produits de boulangerie grâce à des modifications biochimiques de la matrice et à une meilleure structuration de la pâte. Ainsi, dans notre étude, la fermentation apparaît comme une stratégie efficace pour compenser partiellement les limitations technologiques liées à l'absence de gluten et améliorer le volume spécifique des biscuits à base de farine de châtaigne.

5.1.3. Facteur d'expansion

Le facteur d'expansion (rapport diamètre/épaisseur, D/E) constitue un indicateur important du comportement de la pâte au cours de la cuisson. Il traduit sa capacité à s'étaler avant la fixation de la structure par la gélatinisation de l'amidon et la coagulation des protéines.

Les résultats obtenus montrent que le biscuit élaboré à partir de farine de châtaigne non fermentée (NF50) présente un facteur d'expansion comparable à celui du témoin. Cette stabilité suggère que l'incorporation de farine de châtaigne non fermentée n'a pas modifié de manière notable l'aptitude de la pâte à s'étaler pendant la cuisson. Ce comportement peut être lié aux propriétés de l'amidon natif et des fibres présentes dans la farine, qui contribue au maintien de la viscosité de la pâte et limitent son étalement excessif. En revanche, le biscuit formulé avec la farine de châtaigne fermentée (F50) présente une augmentation significative du facteur d'expansion, atteignant 9,31 ± 0,14. Cette amélioration peut être attribuée aux modifications biochimiques induites par la fermentation, notamment l'hydrolyse partielle de certains constituants macromoléculaires et la réorganisation des interactions entre les protéines, les polysaccharides et l'eau. Ces transformations entraînent une diminution de la résistance interne de la pâte et favorisent sa fluidité au cours des premières phases de la cuisson.

Par ailleurs, l'augmentation de la capacité de rétention d'eau observée dans la farine fermentée peut contribuer à une meilleure redistribution de l'eau au sein de la matrice facilitant l'expansion du produit sous l'effet de la chaleur. Cette combinaison de phénomènes favorise un étalement plus important de la pâte avant la stabilisation de la structure, conduisant à des biscuits présentant un diamètre plus élevé et un facteur d'expansion supérieur. Des observations similaires ont été rapportées par Gómez *et al.* (2010) et Paciulli *et al.* (2018), qui ont montré que les modifications rhéologiques induites par les traitements technologiques influencent fortement l'étalement et les caractéristiques dimensionnelles des biscuits.

Dans l'ensemble, les résultats obtenus montrent que la fermentation de la farine de châtaigne par *Lactobacillus plantarum* a significativement influencé les propriétés physiques des biscuits. Comparativement à la farine non fermentée, l'utilisation de farine fermentée a permis de réduire la teneur en humidité finale tout en améliorant le volume spécifique et le facteur d'expansion. Ces modifications traduisent une amélioration du comportement technologique de la pâte, attribuable aux transformations biochimiques et structurales induites par la fermentation. L'hydrolyse partielle des macromolécules, la réorganisation des interactions entre les constituants de la matrice et l'augmentation de la capacité de rétention d'eau ont favorisé une meilleure expansion du produit au cours de la cuisson. Ainsi, la fermentation apparaît comme une stratégie efficace pour améliorer la qualité physique des biscuits à base de farine de châtaigne, en contribuant à l'obtention de produits plus légers, mieux développés et potentiellement plus appréciés sur le plan sensoriel.

5.2. Analyse de la couleur des biscuits formulés

Les résultats mettent en évidence un impact significatif de l'incorporation de farine de châtaigne et de son traitement par fermentation biologique sur les propriétés colorimétriques des biscuits formulés. Les variations observées dans l'espace CIELab traduisent des modifications profondes de la matrice alimentaire, résultant à la fois de la composition intrinsèque de la châtaigne et des transformations biochimiques induites par la fermentation.

Le biscuit témoin enregistre la valeur de clarté la plus élevée ($L^* = 67,30 \pm 0,50$), associée à un indice de rouge modéré ($a^* = 6,40 \pm 0,20$) et à un indice de jaune prononcé ($b^* = 35,10 \pm 0,80$), lui conférant une teinte jaune-orangée claire caractéristique des biscuits à base de farine

standard de riz et de maïs. Ces valeurs constituent la référence de base à partir de laquelle sont évaluées les modifications induites par les formulations alternatives.

L'incorporation de 50% de farine de châtaigne non fermentée (lot NF50) provoque une diminution drastique de la clarté par rapport au témoin (L* passant de 67,30 à 35,10), combinée à une augmentation nette de l'indice de rouge (a* = 11,70 ± 0,10) et à une réduction prononcée de l'indice de jaune (b* = 18,40 ± 0,30), aboutissant à une teinte beaucoup plus sombre, mate et terreuse de type Afghan Tan (#8B5628). Ce profil chromatique est en parfait accord avec les travaux de Silav-Tuzlu et Tacer-Caba (2021) et Stoin *et al*. (2025), qui ont démontré que la richesse intrinsèque *de Castanea sativa* Mill. En composés phénoliques totaux, en fibres denses et en tanins induit un brunissement thermique intense et mat lors de la cuisson par caramélisation et oxydation.

En revanche, le biscuit enrichi en farine de châtaigne fermentée (biscuit F50) affiche un comportement colorimétrique distinct et scientifiquement remarquable par rapport au témoin et au lot NF50. Les valeurs moyennes révèlent une clarté supérieure à celle du lot NF50 (L* = 43,25 ± 0,65), tout en demeurant inférieure à celle du témoin, avec une atténuation de l'indice de rouge (a* = 9,35 ± 0,15) et une légère augmentation de l'indice de jaune (b* = 19,65 ± 0,15), conférant aux biscuits une teinte brun-dorée chaude, brillante et homogène de type Dark Tan/Bourbon (9C6C41). Visuellement, cette couleur s'avère beaucoup plus attractive pour le dégustateur que celle du lot NF50.

Comme l'ont démontré Yĭldĭrĭm Vardin *et al*. (2026), ce comportement s'explique par l'activité métabolique contrôlée des bactéries lactiques durant la fermentation, qui consomment certains polyphénols libres et libèrent de manière sélective des sucres réducteurs libres ainsi que des acides aminés à chaînes courtes (via la protéolyse). Ces précurseurs s'engagent lors de la cuisson de manière plus uniforme et contrôlée dans la réaction de Maillard et les voies de caramélisation thermique.

La méthode colorimétrique utilisée dans cette étude s'appuie sur le protocole décrit par Djeghim *et al*. (2021), validé pour l'analyse instrumentale de la couleur dans les produits de boulangerie sans gluten.

Conclusion

Cette étude vise à valoriser la farine de châtaigne, sans gluten et hautement nutritive, par une fermentation lactique contrôlée avec le *Lactobacillus plantarum*. Face aux limites technologiques et sensorielles ainsi qu'au manque de recherches dédiées à ce procédé dans le secteur de la biscuiterie, les travaux évaluent l'impact de cette biotechnologie sur l'amélioration des propriétés physico-chimiques, technologiques et antioxydantes de la farine, ainsi que sur la qualité globale des biscuits finis.

Les résultats obtenus ont globalement confirmé l'hypothèse de travail formulée au début de l'étude, qui se résument essentiellement :

- Sur le plan physico-chimique, la fermentation a induit une acidification significative du milieu, reflétant une activité métabolique intense des bactéries lactiques. Cette acidification s'est accompagnée d'une mobilisation accrue des sucres fermentescibles : les sucres réducteurs sont passés de 2,25 % à 4,73 % , et les sucres totaux de 4,33 % à 7,90 %.
- Sur le plan de la composition proximale, la fermentation a entraîné une augmentation notable de la teneur en protéines, une diminution des matières grasses, des fibres brutes et des cendres, tandis que l'humidité est restée stable entre les deux farines.
- Sur le plan techno-fonctionnel, la fermentation a nettement amélioré la rétention en eau et en huile, deux paramètres essentiels pour formuler des produits de biscuiterie de qualité. Par contre, le pouvoir émulsifiant a diminué et la capacité de gonflement est restée stable.
- Sur les plans nutritionnel et antioxydant, une augmentation significative du contenu en polyphénols totaux de 945 à 1421 mg EAG/100g MS, en flavonoïdes totaux de 391,42 à 681,34 mg EC/100g MS, et en activité anti radicalaire DPPH de 88,790 % à 90,356 %, alors ;la poudre fermentée se positionne ainsi comme un ingrédient fonctionnel à haute valeur nutraceutiques.
- L'intégration de 50 % de farine fermentée dans la matrice riz-maïs a permis d'obtenir la formulation optimale (F50), qui présente des propriétés texturales, chromatiques et sensorielles supérieures à celles du témoin, ainsi qu'une acceptabilité globale et une intention d'achat significativement plus élevées, soutenues par la nouveauté du produit et sa valeur nutritionnelle.

En conclusion, la fermentation lactique par *Lactobacillus plantarum* apparaît comme une stratégie de valorisation biotechnologique efficiente, écologique et économiquement accessible, transformant la châtaigne, une ressource saisonnière souvent sous-exploitée malgré son abondance dans les zones montagneuses algériennes en un ingrédient fonctionnel de haute qualité, et ouvrant la voie au développement de biscuits sans gluten adaptés aux personnes intolérantes, tout en valorisant le patrimoine agro-alimentaire.

Des investigations complémentaires permettraient de consolider les résultats de cette étude et d'envisager une transposition à l'échelle semi-industrielle, voire industrielle :

- Caractérisation du profil en acides aminés libres issus de la protéolyse fermentaire.

- Identification des composés volatils responsables de l'arôme par GC-MS.

- Évaluation de la digestibilité in vitro des amidons et des protéines.

- Réalisation d'essais de conservation accélérée des biscuits formulés.

- Substitution aux produits importés pour soutenir le développement national de la biscuiterie.

Référence bibliographique

AACC International. (2000). Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists (10th ed.). Method 02-52.01 (pH) and Method 10-50D

Achi, O. K., & Asamudo, N. U. (2019). Cereal-based fermented foods of Africa as functional foods. In J.-M. Mérillon & K. G. Ramawat (Eds.), Bioactive molecules in food (pp. 1527–1557). Springer Nature Switzerland AG. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78030-6_31

Adebiyi, J.A., Obadina, A.O., Adebo, O.A. & Kayitesi, E. (2017). Comparison of nutritional quality and sensory acceptability of biscuits obtained from native, fermented, and malted pearl millet (Pennisetum glaucum) flour. Food Chemistry, 232, 210–217.

Adebo, J. A., Njobeh, P. B., Gbashi, S., Oyedeji, A. B., Ogundele, O. M., Oyeyinka, S. A., & Adebo, O. A. (2022). Fermentation of cereals and legumes: Impact on nutritional constituents and nutrient bioavailability. Fermentation, 8(2), 63.

Adebo, J. A. (2023). A review on the potential food application of lima beans (Phaseolus lunatus L.), an underutilized crop. Applied Sciences, 13(3), 1996.

AFNOR, 1991. Céréales et produits céréaliers. Détermination de l'amidon et de protéines. Association Française de Normalisation. Edition AFNOR, Paris, 264, 360 p.

Aguilar, N., Albanell, E., Miñarro, B., & Capellas, M. (2016). Chestnut flour sourdough for gluten-free bread making. European Food Research and Technology, 242(11), 1795-1802.

Ahmed W., Humaira H., AfshanMumtaz H., Adil G et Ashwar BA.(2017). Propriétés physicochimiques, rhéologiques et antioxydante du châtaignier (*Castanea sativa* Mill.), affecté par la rôtissoire et la micro-onde. *Journal of Advanced Research*, 399-405.

Alam, M. S., Ahmad, M., & Ahsan, H. (2023). Standard methods for functional and technofunctional characterization of novel food flours. International Journal of Gastronomy and Food Science, 32, 100695: https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2023.100695

Al-Tawaha, R., & Meng, C. (2018). Potential benefits of Lactobacillus plantarum as probiotic and its advantages in human health and industrial applications: A review. Adv. Environ. Biol, 12, 16-27.

Ammar, I., Ennouri, M., & Attia, H. (2022). Influence of sourdough fermentation on the rheological properties and quality of gluten-free biscuits enriched with chestnut flour. Journal of Food Science and Technology, 59(3), 1045-1054.

Ansari, M. M., & Kumar, S. (2012). Fortification of Food and Beverages with Phytonutrients. Food and Public Health, 2(6).

ANSES-CIQUAL .(2016). Table de composition nutritionnelle des aliments. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.

ANSES. (2025). Table Ciqual: Composition nutritionnelle des aliments.

AOAC International. (2005). Official Methods of Analysis of AOAC International (18th ed.). Method 926.12 (Moisture) and Method 942.05

Aponte, M., Blaiotta, G., La Croce, F., Buccione, S., Russo, P., Spano, G., & Pepe, O. (2013). Use of Selected Autochthonous Lactic Acid Bacteria for Chestnut Flour Fermentation. Food Microbiology, 34(2), 265-271.

Badia-Olmos, C., Mateos-Aparicio, I., & San Román, A. (2023). Techno-functional and structural properties of legume and pseudo-cereal flours under processing conditions. International Journal of Gastronomy and Food Science, 33, 100720.

Badia-Olmos, C., Sánchez-García, J., Laguna, L., Zúñiga, E., Haros, C. M., Andrés, A. M., & Tarrega, A. (2024). Flours from fermented lentil and quinoa grains as ingredients with new techno-functional properties. Food Research International, 177, 113915.

Barros, L., Ferreira, M. J., Queirós, B., Ferreira, I. C., & Baptista, P. (2010). Total phenols, ascorbic acid, β-carotene and lycopene in Portuguese wild edible mushrooms and chestnut. Food and Chemical Toxicology, 48(6), 1682-1689.

Béal, C., Loubière, P., & Corrieu, G. (2008). Les bactéries lactiques : aspects fondamentaux et technologiques. Lait, 88(1), 1-20.

Becila, F. Z., Bouasla, A., Turchiuli, C., Boussekine, R., Bekhouche, F., & Wójtowicz, A. (2022). Biochemical and microbiological changes associated with fermentation of durum wheat for lemzeïet processing, a traditional Algerian fermented food. Processes, 10(11), 2347.

Bilgiçli, N., Elgun, A., Herken, E. N., Turker, S., Ertas, N., & Ibanoglu, S. (2006). Effect of wheat germ/bran addition on the chemical, nutritional and sensory quality of tarhana, a fermented wheat flour-yoghurt product. Journal of Food Engineering, 77(3), 680-686.

Borges, O., Gonçalves, B., Carvalho, J. L. S., Correia, P., & Silva, A. P. (2008). Nutritional quality of chestnut (Castanea sativa Mill.) cultivars from Portugal. Food Chemistry, 106(3), 976–984. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.07.011

Bounous, G. (2004). The chestnut: a multipurpose resource for the new millennium. In III International Chestnut Congress 693 (pp. 33-40).

Bourekoua, H., Benatallah, L., Zidoune, M.N., & Rosell, C.M. (2016). Developing gluten free bakery improvers by hydrothermal treatment of rice and corn flours. LWT — Food Science and Technology, 73, 342–350. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.06.029

Bresciani, A., Sergiacomo, A., De Stefani, A., & Marti, A. (2024). Impact of sprouted chickpea grits and flour on dough rheology and bread features. Foods, 13(17), 2698.

Breisch H. (1995). Châtaigne et marron. CTIFL, 240 p.

Çabuk, B.; Stone, A.K.; Korber, D.R.; Tanaka, T.; Nickerson, M.T. (2018a). Effect of Lactobacillus plantarum Fermentation on the Surface and Functional Properties of Pea Protein-Enriched Flour. Food Technol. Biotechnol. 2018, 56, 411–420.

Çabuk, B.; Nosworthy, M.G.; Stone, A.K.; Korber, D.R.; Tanaka, T.; House, J.D.; Nickerson, M.T. (2018b). Effect of Fermentation on the Protein Digestibility and Levels of Non-Nutritive Compounds of Pea Protein Concentrate. Food Technol. Biotechnol. 2018, 56, 257–264.

Chandra-Hioe, M.V.; Wong, C.H.; Arcot, J. The potential use of fermented chickpea and faba bean flour as food ingredients (2016). Plant Foods Hum. Nutr. 2016, 71, 90–95.

Chebini, D., & Driche, C. (2019). Contribution à l'étude des propriétés physico-chimiques, antioxydantes et fonctionnelles des farines du fruit de chêne (Quercus rotundifolia) et de la châtaigne (Castanea sativa) [Mémoire de fin de cycle, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou].

Chiacchio, M. F., Tagliamonte, S., Pazzanese, A., Vitaglione, P., & Blaiotta, G. (2025). Lactic acid fermentation improves nutritional and functional properties of chickpea flours. Food Research International, 203, 115899

Coda, R., Di Cagno, R., Gobbetti, M., & Rizzello, C. G. (2014). Sourdough lactic acid bacteria: Exploration of non-wheat cereal-based fermentation. Food Microbiology, 37, 51–58. https://doi.org/10.1016/j.fm.2013.06.018

Correia, P., Leitão, A., & Beirão-da-Costa, M. L. (2009). The effect of drying temperatures on morphological and chemical properties of dried chestnuts flours. Journal of Food Engineering, 90(3), 325–332.https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.040

Correia, P., Beirão-da-Costa, M. L. (2012). Effect of drying temperatures on starch- related functional and thermal properties of chestnut flours. Food and Bioproducts Processing, 90(2), 284–294.

Correia, P., & Beirão-da-Costa, M. L. (2013). Chemical composition and functional properties of native chestnut starch (Castanea sativa Mill.). Carbohydrate Polymers, 99, 617–624.

Cronquist, A. (1981). An Integrated System of Classification of Flowering Plants. Columbia University Press.

Cruz, B.R., Abraão, A.S., Lemos, A.M., & Nunes, F.M. (2013). Chemical composition and functional properties of native chestnut starch (*Castanea sativa* Mill). *Carbohydrate Polymers*, 94(1), 594–602.

Dall'Asta, C., Cirlini, M., & Galaverna, G. (2013). Chestnut flour: A potential ingredient for gluten-free bakery products. Food Chemistry, 141(2), 1445-1452.

De Pasquale, I., Pontonio, E., Gobbetti, M., & Rizzello, C. G. (2020). Nutritional and functional effects of the lactic acid bacteria fermentation on gelatinized legume flours. International Journal of Food Microbiology, 316, Article 108426.

Dekoumi B. (1978). Etude des possibilités d'extension du châtaignier (Castanea sativa Mill.) en Algérie. Thèse Ing. Agron., INA, Alger, 81 p.

Demiate, I. M., Oetterer, M., & Wosiacki, G. (2001). Characterization of chestnut (Castanea sativa Mill.) starch for industrial utilization. Brazilian Archives of Biology and Technology, 44(1), 69–78.

Demirkesen, I., Mert, B., Sumnu, G., & Sahin, S. (2010). Utilization of chestnut flour in gluten-free bread formulations. Journal of Food Engineering, 101(4), 329–336.

Demirkesen, I. (2016). Formulation of chestnut cookies and their rheological and quality characteristics. Journal of Food Quality, 39(4), 264-273.

Desmaison, A. M., & Adrian, J. (1986). La châtaigne : Composition et valeur nutritionnelle. Médecine et Nutrition, 22(4),215-222.

Devi, A., & Khatkar, B. S. (2016). Physicochemical, rheological and functional properties of fats and oils in relation to cookie quality: A review. Journal of Food Science and Technology, 53(10), 3633-3641.

Dhen, N., Ben Rejeb, I., Ghorbal, A., Miled, R. P., & Ghazali, H. M. (2016). Physicochemical and functional properties of legume flours. Journal of Food Science and Technology, 53(4), 1960–1969.

Djeghim, F., Bourekoua, H., Różyło, R., Bieńczak, A., Tanaś, W., & Zidoune, M.N. (2021). Effect of By-Products from Selected Fruits and Vegetables on Gluten-Free Dough Rheology and Bread Properties. Applied Sciences, 11(10), 4605. https://doi.org/10.3390/app11104605.

Donzo, M., Diaby, M., & Kouyaté, A. M. (2015). Extraction and quantification of secondary metabolites in plant extracts using colorimetric assays. International Journal of Chemical Sciences, 13(2), 645-654. https://www.academia.edu/.

Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. Analytical Chemistry, 28(3), 350-356.

Dueñas, M.; Fernández, D.; Hernández, T.; Estrella, I.; Muñoz, R. Bioactive phenolic compounds of cowpeas (Vigna sinensis L). Modifications by fermentation with natural microflora and with Lactobacillus plantarum ATCC 14917. J. Sci. Food Agric. 2005.

Emkani, M., Oliete, B., & Saurel, R. (2022). Effect of Lactic Acid Fermentation on Legume Protein Properties — A Review. Fermentation, 8(6), 244.https://doi.org/10.3390/fermentation8060244

Encyclopedia MDPI (2023). Castanea sativa Mill. Chemical Composition. Entry collection.

Erem, E., & Kilic-Akyilmaz, M. (2024). The Role of Fermentation With Lactic Acid Bacteria in Quality and Health Effects of Plant-Based Dairy Analogues. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 23(4), e13402. https://doi.org/10.1111/1541-4337.13402.

Fadlallah, O. E., Abdullahi, H., & Babiker, E. E. (2010). Effect of fermentation on biochemical characteristics of sorghum flour supplemented with chickpea flour. Journal of Applied Sciences Research, 6(7), 860-865.

Fardet, A. (2019). Aliments fonctionnels et fonctionnalité de l'alimentation. Dans : Aliments fonctionnels, Chapitre 2.

Fellows, P. (2000). Food Processing Technology: Principles and Practice (2ème éd.). Woodhead Publishing.

Fellows, P. J. (2017). Food Processing Technology: Principles and Practice (4th ed.). Woodhead Publishing, pp. 45–60.

Ferradji, S., Bourekoua, H., Djeghim, F., Ayad, R., Krajewska, M., Różyło, R. (2024). Development of a Novel Gluten-Free Cookie Premix Enriched with Natural Flours Using an Extreme Vertices design: Physical, Sensory, Rheological, and Antioxidant Characteristics. Applied Sciences, 14(22), 10391.

Filannino, P., Di Cagno, R., et Gobbetti, M. (2018). Metabolic and functional paths of lactic acid bacteria in plant foods: Get out of the labyrinth. Current opimion in Biotechnolgy,49,64–72.

Fredot, A. (2005). Connaissances des aliments. Lavoisier.

Freitas, A., Moldão-Martins, M., & Beirão-da-Costa, S. (2023). Improving chestnut physicochemical properties through fermentation – Development of chestnut Amazake. Current Research in Food Science, 6, 100450. https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100450.

Purlis, E. (2010). Browning development in bakery products — A review. Journal of Food Engineering, 99(3), 239–249. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.03.008

Gänzle, M. G. (2014). Enzymatic and bacterial conversions during sourdough fermentation. Food Microbiology, 37, 2–10.

García Arteaga, V., Leffler, S., Muranyi, I., Eisner, P., & Schweiggert-Weisz, U. (2021). Sensory profile, functional properties and molecular weight distribution of fermented pea protein isolate. Current Research in Food Science, 4, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.crfs.2020.12.001

Gernah, D. I., Ariahu, C. C., & Ingbian, C. C. (2011). Effects of malting and lactic fermentation on some chemical and functional properties of maize (Zea mays). American Journal of Food Technology, 6(5), 404-412.

Giacalone, G., & Bounous, G. (1993). Post-harvest storage of chestnut fruits. Acta Horticulturae, 347, 289-294.

Gobbetti, M., Di Cagno, R., & De Angelis, M. (2010). Functional properties of Lactobacillus plantarum in fermented food matrices. International Journal of Food Microbiology, 140(2), 121-128.

Gobbetti, M., De Angelis, M., Di Cagno, R., Calasso, M., Archetti, G., & Rizzello, C. G. (2019). Novel insights on the functional/nutritional features of the sourdough fermentation. International journal of food microbiology, 302, 103-113.

Gomes-Laranjo, J., Silva, A. M., Martins-Gomes, C., Marques, T., Coutinho, T. E., Teixeira, A. L., Vilela, A., & Gonçalves, C. (2025). Bioactive compounds in chestnut (Castanea sativa Mill.): Composition, health-promoting properties, and technological applications. Applied Sciences, 15(24), 13069.

Gómez, M., Oliete, B., Rosell, C. M., Pando, V., & Fernández, E. (2010). Studies on cake quality made of wheat-chickpea flour blends. Food Science and Technology International, 16(2), 149-156.

Guetarni, H., Elkloei, B., & Ayadi, A. (2024). Biochemical, physiological and technological properties of Lactic Acid Bacteria isolated and characterized from hard and soft wheat. Annals of Arid Zone, 63(1), 9–21. DOI: 10.59512/aaz.2024.63.1.2.

Hadef, S. (2012). Évaluation des aptitudes technologiques et probiotiques des bactéries lactiques locales [Mémoire de Magister]. Université Kasdi Merbah-Ouargla.

Hegazy, N., Kamil, M.M., Hussein, A. & Bareh, G. (2014). Utilization of chestnut flour in production of improved biscuit.

Henneberg, W., & Stohmann, F. (1864). Beiträge zur Begründung einer rationellen Fütterung der Wiederkäuer [Contributions to the establishment of a rational feeding of ruminants]. Schwetschke und Sohn.: https://books.google.com

Hur, S. M., Lee, S. Y., & Kim, Y. C. (2014). Effect of lactic acid fermentation on biotransformation of nutrients and antinutritional factors in plant-based foods. Food Chemistry, 152, 205-212.

ICC. (2006). International Association for Cereal Science and Technology Standards. Method 110/1: Determination of moisture content of cereals and cereal products. ICC.

INRF (1984). La production des châtaigneraies de la wilaya de Tizi-Ouzou. Document interne, 15 p.

INRA (1987). Premier catalogue officiel des variétés de châtaignes et marrons. Documents GEVES, pp. 31-33.

Ismail, T., Sestili, P., & Akhtar, S. (2017). Pomegranate peel polyphenols: Progress on analytical, biological and health aspects. Food Chemistry, 215, 299-308.:

ISO 11085 (2015) Corps gras d'origines animale et végétale — Détermination de la teneur en lipides par extraction (méthode Soxhlet). -AOAC International (2019). Official Methods of Analysis (méthodes d'extraction des matières grasses, Soxhlet).

Issar, K., 2011. Studies on extraction and characterization of dietary fibre from apple pomace and its utilization for preparation of fibre enriched products. Thèse de doctorat en Horticultur (Technologie post-récolte) Collège d'Horticulture.Université Dr Yashwant Singh Parmar de l'Horticulture et de la Foresterie, Nauni, Solan - 173 230 (H.P.), Inde, 145 p.

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

Kedare, S. B., & Singh, R. P. (2011). Genesis and development of DPPH method of antioxidant assay. Journal of Food Science and Technology, 48(4), 412-422. (Article).

Kinsella, J. E., & Melachouris, N. (1976). Functional properties of proteins in foods: a survey. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 7(3), 219–280.

Krebs, P., Conedera, M., Pradella, M., Torriani, D., Felber, M., & Tinner, W. (2004). Quaternary refugia of the sweet chestnut (Castanea sativa Mill.): an extended palynological approach. Vegetation History and Archaeobotany, 13(3), 145–160. (Lib4ri).

Lai, L.-R., Hsieh, S.-C., Huang, H.-Y., & Chou, C.-C. (2013). Effect of lactic fermentation on the total phenolic, saponin and phytic acid contents as well as anti-colon cancer cell proliferation activity of soymilk. Journal of Bioscience and Bioengineering, 115(5), 552–556. https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2012.11.022

Lassoued-Oualdi, N. (2005). Structure alvéolaire des produits céréaliers de cuisson [Thèse de Doctorat]. AgroParisTech.

Li, Q., Shi, X., Zhao, Q., Cui, Y., Ouyang, J., & Xu, F. (2016). Effect of cooking methods on nutritional quality and volatile compounds of Chinese chestnut (Castanea mollissima Blume). Food Chemistry, 201, 80-86.

Liao, A-M., Zhang, J., Yang, Z-L., Huang, J-H., Pan, L., Hou, Y-C., Li, X-X., Zhao, P-H., Dong, Y-Q., Hu, Z-Y., & Hui, M. (2022). Structural, Physicochemical, and Functional Properties of Wheat Bran Insoluble Dietary Fiber Modified With Probiotic Fermentation. Frontiers in Nutrition, 9, 803440. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.803440

Liew, S. Q., Chin, N. L., & Yusof, Y. A. (2014). Extraction and characterization of citric acid-extracted pectic substances from citrus peels. Food Hydrocolloids, 35, 103-109:

Limón, R.I.; Peñas, E.; Torino, M.I.; Martínez-Villaluenga, C.; Dueñas, M.; Frias, J .(2015). Fermentation enhances the content of bioactive compounds in kidney bean extracts. Food Chem. 2015, 172, 343–352.

Lioré, J. (2021). La châtaigne : énergie et autarcie. L'École des Aliments. http://lecoledesaliments.fr/wp-content/uploads/2021/09/Chataignes.pdf

Lopez, Hélène W., Coudray, Charles, Bellanger, Jean-Claude, Younes, Haddou, Demigné, Christian, & Rémésy, Christian. (2002). Minerals and phytic acid interactions. International Journal of Food Science & Technology, 37(7), 727-735.

Ma, Z., Boye, J. I., Simpson, B. K., Prasher, S. O., Monpetit, D., & Malcolmson, L. (2011). Thermal processing effects on the functional properties and microstructure of lentil, chickpea, and pea flours. Food Research International, 44(8), 2534–2544.

Maache-Rezzoug, Z., Bouvier, J. M., Allaf, K., & Patras, C. (1998). Effect of mixing conditions on rheological properties of biscuit dough and quality of biscuits. Journal of Food Engineering, 35(1), 23-31.

Makawi, A. B., Mustafa, A. I., Adiamo, O. Q., & Mohamed, A. I. A. (2019). Physicochemical, nutritional, functional, rheological, and microbiological properties of sorghum flour fermented with baobab fruit pulp flour as starter. Food Science & Nutrition, 7(2), 689-699.

Mamat, H., & Hill, S. E. (2014). Effect of fat types on the structural and textural properties of dough and semi-sweet biscuit. Journal of Food Science and Technology, 51(9), 1998-2005.

Manley, D. (1998a). Biscuit, Cookie, and Cracker Manufacturing - Manual 3: Biscuit dough piece forming. Woodhead Publishing.

Manley, D. (1998b). Biscuit, cookie and cracker manufacturing manuals: Manual 5: Secondary processing in biscuit manufacturing. Woodhead Publishing.

Manley, D. (2000). Technology of biscuits, crackers and cookies (3ème éd.). Woodhead Publishing.

Manley, D. (2001). Biscuit, cracker and cookie recipes for the food industry. Woodhead Publishing.

Marco, M. L., Heeney, D., Binda, S., Cifelli, C. J., Cotter, P. D., Foligné, B., ... & Hutkins, R. (2017). Health benefits of fermented foods: microbiota and beyond. Current Opinion in Biotechnology, 44, 94-102.

Massantini, R., Moscetti, R., & Frangipane, M. T. (2021). Evaluating progress of chestnut quality: A review of recent developments. Food Science and Technology, 113, 245–254.

McCue, P.P.; Shetty, K. A model for the involvement of lignin degradation enzymes in phenolic antioxidant mobilization from whole soybean during solid-state bioprocessing by Lentinus edodes. Process Biochem. 2005, 40, 1143–1150.

Medic, A., Kunc, P., Zamljen, T., Hudina, M., Veberic, R., & Solar, A. (2023). Identification and Quantification of the Major Phenolic Constituents in Castanea sativa and Commercial Interspecific Hybrids (C. sativa × C. crenata) Chestnuts Using HPLC–MS/MS. International Journal of Molecular Sciences, 24(17), 13086. https://doi.org/10.3390/ijms241713086.

Mete, M., & Dülger Altiner, D. (2017). Chestnut flour and applications of utilization. International Journal of Food Engineering Research (IJFER), 3(1), 9-16.

Mintel (2025). Global Food and Drink Trends : The shift towards natural functionality and clean label..

Mirzaei, Hassan, Karimi, Mohammad, & Mortazavi, Seyed Ali. (2026). Technological characteristics of wheat germ flour fermented by paraprobiotic strains of Lactobacillus acidophilus and Lactiplantibacillus plantarum. Journal of Food Measurement and Characterization, 20(1), 115-128.

Mohammadi, M., Khorshidian, N., Yousefi, M., & Khaneghah, A. M. (2022). Physicochemical, rheological, and sensory properties of gluten-free cookie produced by flour of chestnut, date seed, and modified starch. Journal of Food Quality, 2022, Article.

Mokhtari, S., Taghouti, M., Saidi, D., & Kheroua, O. (2020). Traditional Algerian fermented food: first data on nutritional characteristics of wheat (Triticum durum) fermented in underground silos Matmor (Mascara, Algeria) compared to unfermented wheat. Advances in Biology & Earth Sciences, 5(3).

Molyneux, P. (2004). The use of the stable free radical diphenylpicrylhydrazyl (DPPH) for estimating antioxidant activity. Songklanakarin Journal of Science and Technology, 26(2), 211-219. (Article).

Monnet, C., Landaud, S., & Bonnarme, P. (2008). Growth and adaptation of microorganisms in cheese. International Journal of Food Microbiology, 125(3), 229-237.

Mousavi Khaneghah, A., Abhari, K., & Sant'Ana, A. S. (2018). Lactic acid fermentation of bakery products: Flavour, texture, and gas retention. Trends in Food Science & Technology, 78, 112-121.

Mozzi, F., Raya, R. R., & Vignolo, G. M. (2010). Biotechnology of Lactic Acid Bacteria: Novel Applications. Wiley-Blackwell.

Mudau, M., Mashau, M. E., & Ramashia, S. E. (2022). Nutritional quality, antioxidant, microstructural and sensory properties of spontaneously fermented gluten-free finger millet biscuits. Foods, 11(9), 1265. https://doi.org/10.3390/foods11091265.

Mudgil, D., Barak, S. et Khatkar, B.S., 2017. Cookie texture, spread ratio and sensory acceptability of cookies as a function of soluble dietary fiber, baking time and different water levels. LWT - Food Science and Technology, 80: 537-542.

Ndangui, C. B. (2015). Production et caractérisation de farine de patate douce [Thèse de Doctorat]. Université de Lorraine.

Nhouchi, Z., Botosoa, E. P., & Karoui, R. (2018). Critical assessment of formulation, processing and storage conditions on the quality of alveolar baked products. Trends in Food Science & Technology, 81.

Nielsen, S. S. (Ed.). (2017). Food Analysis (5th ed.). Springer.

Noah Abimbola, A. (2017). Production, microbial and sensory qualities of biscuits produced from wheat-coconut-almond flour blend. International Journal of Food Science and Nutrition, 2(6).

Nutriting (2023). La châtaigne, une bonne alternative aux féculents traditionnels. Dossier Nutrition.

Office National des Forêts / INRAE. [En ligne]. Consulté en 2025. Disponible sur : https://climessences.fr/castanea-sativa-mill-chataignier-commun

Ojokoh, A., & Bello, B. (2014). Effect of fermentation on nutrient and anti-nutrient composition of millet (Pennisetum glaucum) and soyabean (Glycine max) blend flours. Journal of Life Sciences, 8(8), 668-675.

Okpala, L. C., & Okoli, E. C. (2013). Optimization of composite flours biscuits by mixture response surface methodology. Food Science and Technology International.

Oniszczuk, A., Wojtunik-Kulesza, K. A., Oniszczuk, T., & Kasprzak, K. (2019). Phenolic acids composition and antioxidant activity of chestnut flour and products. Journal of Analytical Methods in Chemistry, 2019, 1-9.

Othman, A., Ismail, A., Abdul Ghani, N., & Adenan, I. (2007). Antioxidant capacity and phenolic content of cocoa beans. Food Chemistry, 100(4), 1523-1530. (Article(.

Otles, S., Can-Sahna, A. S., & Atilla, A. S. (2023). Development and Characterization of Functional Cookies Enriched with Chestnut Shells Extract. Foods, 12(3), 441.

Oyaizu, M. (1986). Studies on products of browning reaction: Antioxidative activities of products of browning reaction prepared from glucosamine. The Japanese Journal of Nutrition and Dietetics, 44(6), 307-315.

Paciulli, M., Chiavaro, E., & Littardi, P. (2018). Influence of chestnut flour on the physico-chemical and sensory properties of gluten-free biscuits. Journal of Food Science and Technology, 55, 3331-3338.

Petrova, P., & Petrov, K. (2020). Lactic Acid Fermentation of Cereals and Pseudocereals: Ancient Nutritional Biotechnologies with Modern Applications. Nutrients, 12(4), 1118.

Pinto, D., de Juana, A. V., Santana, A., & Regueiro, J. (2021). Optimizing the extraction of phenolic compounds from Castanea sativa shells. Food Chemistry, 345, 128835.

Popovici, C., Saykova, I. and Tylkowsk, B. (2009) Evaluation de l'activité antioxydant des composés phénoliques par la réactivité avec le radical libre DPPH. Revue de Génie Industriel, 4, 25-39.

Rabhi K. & Messaoudène M. (2018). Dendroécologie du châtaignier dans l'Akfadou (Algérie). Forêt Méditerranéenne.

Reddy, N. R., & Sathe, S. K. (2002). Food Phytates. CRC Press.

Renzetti, C. M., & Miley, C. H. (2014). Violence in gay and lesbian domestic partnerships. Routledge.

Ritthibut, N., Jin, Y. Y., Lim, S. T., & Oh, S. J. (2022). Antioxidant and in vitro cosmeceutical activities of chestnut inner shell fermented by Monascus kaoliang. Food Science and Biotechnology, 32(6), 813–822.

Rizzello, C. G., Lorusso, A., Montemurro, M., & Gobbetti, M. (2016). Use of sourdough made with quinoa (Chenopodium quinoa) flour and autochthonous selected lactic acid bacteria for enhancing the nutritional, textural and sensory features of white bread. Food microbiology, 56, 1-13.

Saadoudi, M. (2017). Caractérisation biochimique et essais d'élaboration des produits à base du fruit de Zizyphus lotus L. [Thèse de Doctorat]. Université de Batna 1.

Saadoudi, M. (2019). Technologie de pétrissage et de fermentation des pâtes fermentées. Éditions OPU, Alger.

Sabater, C., Sáez, G. D., Suárez, N., Garro, M. S., Margolles, A., & Zárate, G. (2024). Fermentation with Lactic Acid Bacteria for Bean Flour Improvement: Experimental Study and Molecular Modeling as Complementary Tool s. Foods, 13(13), 2105. https://doi.org/10.3390/foods13132105.

Sacchetti, G., Pinnavaia, G. G., Guidolin, E., & Dalla Rosa, M. (2004). Effects of extrusion temperature and feed composition on the functional, physical and sensory properties of chestnut and rice flour-based snack-like products. Food Research International, 37(5), 527–534.

Sancho, R. A. S., & Pastore, G. M. (2012). Evaluation of the effects of fermentation on the phenolic compounds and antioxidant activity of plant products: Pinto A review. Food Research International, 49(1), 324-334.

Serra, B., Mendonça, M., & Silva, L. (2001). Colorimetric determination of total flavonoids in plant-derived food products. Food Chemistry, 72(4), 489-495.

Serrem, C. A. (2010). Development of soy fortified sorghum and bread wheat biscuits [Thèse de Doctorat]. Université de Pretoria.

Serrem, C. A., & Zhou, W. (2014). [Étude sur la structure et l'humidité des biscuits]. International Journal of Food Properties, 17(4), 812-825.

Shen, N., Wang, T., Gan, Q., Liu, S., Wang, L., & Jin, B. (2022). Plant flavonoids: Classification, distribution, biosynthesis, and antioxidant activity. Food Chemistry, 383, 132531. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132531.

Shi, H., Zhang, M., & Adhikari, B. (2021). Effects of solid-state fermentation on nutritional quality of leaf flour of Moringa oleifera. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 9, 626628.

Silav-Tuzlu, G., & Tacer-Caba, Z. (2021). Influence of Chia Seed, Buckwheat and Chestnut Flour Addition on the Overall Quality and Shelf Life of the Gluten-Free Biscuits. Food Technology and Biotechnology, 59(4), 463–474. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8753797/

Singleton, V. L., & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. American Journal of Enology and Viticulture, 16(3), 144-158: https://doi.org/10.1016/S0039-9140(65)80164-1

Sirini, Natalia, Frizzo, Laureano S., Aleu, Gisel, Ruiz, Julia, Rosmini, Marcelo R., & Soto, Belén. (2022). Development of Probiotic Fermented Sausages and Viability Monitoring of Supplemented Lactiplantibacillus plantarum BFL Strain. Fermentation, 8(6), 284.

Šmídová, Z., & Rysová, J. (2022). Gluten-Free Bread and Bakery Products Technology. Foods, 11(3), 480. https://doi.org/10.3390/foods11030480

Stoin, D., Poiana, M.-A., Alexa, E., Cocan, I., Negrea, M., Jianu, C., Radulov, I., Suba, M., & Ianasi, C. (2025). Current Trends in Gluten-Free Biscuit Formulation Using Rice Flour Enriched

with Chestnut Flour and Fruit Powders. Foods, 14(23), 4074. https://doi.org/10.3390/foods14234074

Subaşı, B. (2004). Kestane Sektör Profili. İstanbul Ticaret Odası Etüt ve Araştırma Şubesi, İstanbul.

Sudha, M. L., Vetrimani, R., & Leelavathi, K. (2007). Influence of fibre from different cereal sources on rheological characteristics of wheat flour dough and biscuit quality. Food Chemistry, 105(4), 1264-1270.

Univadis. (2026). Probiotics and Gut Health: Clinical Updates and Nutritional Applications. Medscape / Univadis Knowledge Hub.

Verni M, Rizzello CG and Coda R (2019). Fermentation Biotechnology Applied to Cereal Industry By-Products: Nutritional and Functional Insights. Front. Nutr. 6:42. doi: 10.3389/fnut.2019.00042.

Vioque, J., Alaiz, M.et Giron-Calle, J.2012.Nutritional and functional properties of Vicia faba protein isolates and elated fractions. Food chemistry,132(1) :67-72.

Watts, B-M., Ylimaki, G-L., Jeffery, L-E., Elias, L-G., 1991. Méthodes de base pour l'évaluation sensorielle des aliments. Centre de recherches pour le développement International d'Ottawa. Canada, 159p.

Xing, Q.; Dekker, S.; Kyriakopoulou, K.; Boom, R.M.; Smid, E.J.; Schutyser, M.A. Enhanced nutritional value of chickpea protein concentrate by dry separation and solid-state fermentation. Innov. Food Sci. Emerg. Technol. 2020, 59, 102269.

Yadav, D., Thakur, N., & Sunooj, K. (2012). Effect of Partially De-Oiled Peanut Meal Flour on Biscuits. Food and Nutrition Sciences, 3.

Yang, X., Zhou, X., Zhang, M., Zhang, Z., Song, L., Wang, G., & Zhang, J. (2020). Metabolism analysis for enhanced nutritional profile of chestnuts subjected to anerobic solid-state fermentation by probiotic lactic acid bacteria. Journal of Food Processing and Preservation, 44(3), e14360.

Yıldırım Vardin, A., Göncü, A., & Karaman, A.D. (2026). Effects of Process Parameters and Storage on the Quality Characteristics and Formation of Potential Hazardous Maillard Reaction Products in Gluten-Free Chestnut (Castanea sativa Mill.) Biscuits. Journal of Food Measurement and Characterization. https://doi.org/10.1007/s11694-026-04319-5.

Yilmaz-Ersan, L., Cetin, B., & Topcuoglu, O. (2023). Metabolomic profiling and functional enhancement of probiotic fermented chestnut substrates. LWT - Food Science and Technology, 174, 114-123.

Zheng, J., Wittouck, S., Salvetti, E., Franz, C. M., Harris, H. M., Mattarelli, P., O'Toole, P. W., Pot, B., Vandamme, P., Walter, J., Watanabe, K., Wuyts, S., Felis, G. E., Gänzle, M. G., & Lebeer, S. (2020). A taxonomic note on the genus Lactobacillus: Description of 23 novel genera, emended description of the genus Lactobacillus Beijerinck 1901, and union of Lactobacillaceae and Leuconostocaceae. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 70(4), 2782-2858.

Zhou, W. (2014). Bakery products science and technology (2ème éd.). Wiley Blackwell.

Zidani, S., 2019. Influence des techniques de séchage sur les propriétés physicochimiques et fonctionnelles de la pomme locale. Thèse de doctorat en sciences. Université Hadj Lakhdar Batna 01 (UHB1), Algérie, 134 p.

Zou, M., Li, X., Wang, Y., Chen, J., Zhang, M., & Deng, Z. (2022). Chestnuts in Fermented Rice Beverages Increase Metabolite Diversity and Antioxidant Activity While Reducing Cellular Oxidative Damage. Foods, 11(15), 2212.

Résumé

Cette étude évalue l'effet de la fermentation lactique par *lactobacillus plantarum* (*Lactiplantibacillus plantarum*) sur les propriétés physicochimiques, techno-fonctionnelles et antioxydantes de la farine de châtaigne (*Castanea sativa* Mill.) et sur la qualité des biscuits sans gluten élaborés à partir de cette farine. Les résultats physicochimiques montrent une diminution significative du pH de 6,43 à 4,87 et une augmentation de l'acidité titrable de 0,70 à 1,40 %. La teneur en protéines a augmenté de 5,63 à 7,24 %,et les sucres réducteurs et les sucres totaux ont progressé de manière notable. En revanche, les teneurs en matières grasses, fibres et cendres ont diminué après fermentation. L'évaluation des propriétés techno-fonctionnelles révèle une amélioration significative de la capacité de rétention d'eau (1,66 à 2,62 g/g) et en huile (1,01 à 1,44 g/g), tandis que la capacité de gonflement est restée stable et le pouvoir émulsifiant a diminué de 16,57 à 8,96%. Sur le plan antioxydant, Les polyphénols totaux ont augmenté de 945 à 1421 mg EAG/100 g MS, alors que les flavonoïdes totaux sont passés de 391,42 à 681,34 mg EQ/100 g MS, et l'activité antiradicalaire DPPH de 88,79 à 90,36 %.

Concernant la qualité des biscuits, la formulation F50 incorporant 50% de farine fermentée présente les meilleures caractéristiques sensorielles, physiques et colorimétriques, avec une couleur brun doré attractive et un facteur d'expansion supérieur à celui du témoin. L'analyse sensorielle confirme que cette formulation est la plus appréciée par les dégustateurs.

En conclusion, la fermentation lactique par *Lactobacillus plantarum* améliore certains paramètres (nutritionnelle, fonctionnelles et l'activité antioxydante) de la farine de châtaigne. Elle contribue également à l'amélioration des caractéristiques physiques, technologiques et sensorielles des biscuits sans gluten. La formulation F50 s'est révélée être la plus performante et la plus appréciée par les dégustateurs.

Mots-clés : Farine de châtaigne, *Lactobacillus plantarum* (*Lactiplantibacillus plantarum*), fermentation lactique, biscuits sans gluten, activité antioxydante, propriétés techno-fonctionnelles, analyse sensorielle.