République Algérienne Démocratique et Populaire

Université Abdelhamid Ibn

Mostaganem

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

جامعة عبد الحميد ابن باديس

مستغانم

كلية علوم الطبيعة والحياة

DEPARTEMENT DES SCIENCES ALIMENTAIRES

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Présentée par :

Mme. MEKKI Rachida

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER EN SCIENCES ALIMENTAIRES

Spécialité : Agroalimentaire et contrôle de qualité

THEME

L'activité prébiotique des mucilages et des pectines extraits des grains de fenouil : Applications alimentaires dans les formulations de yaourts fonctionnels.

Soutenu publiquement le 06/11/2025

Devant les membres du jury

Président : M. AIT SAADA Djamal	**U. Mostaganem**	**Professeur**
Encadrant : M. BEKADA Ahmed Med Ali	**U. Mostaganem**	**Professeur**
Examinatrice : Mme. HENNI Nassiba	**U. Mostaganem**	**M.A.A**
Co-encadrant : M. BEKADA Med Anas	**U. Saida**	**Doctorant**

Thématique réalisée au Laboratoire de Technologie Alimentaire et Nutrition- Université de Mostaganem.

Année universitaire 2024-2025

Remerciements

Avant toute chose, je remercie Allah, le Tout-Puissant, de m'avoir donné la force, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail. C'est grâce à Sa miséricorde, à Son aide et à Sa volonté que j'ai pu surmonter les difficultés rencontrées tout au long de ce parcours.

Je tiens à exprimer mes remerciements les plus profonds à M. BEKADA Ahmed, Professeur à l'Université de Mostaganem, pour la qualité de son encadrement, sa rigueur scientifique et ses conseils toujours pertinents. Sa disponibilité, sa confiance et son accompagnement bienveillant ont grandement contribué à la réussite de ce mémoire.

Je remercie également M. BEKADA Anas, mon co-encadrant, pour son suivi attentif, sa patience et son implication constante. Son esprit méthodique, sa gentillesse et son soutien ont été d'un grand apport tout au long de la réalisation de ce travail.

Ma profonde reconnaissance va à M. Aït Saada, qui m'a généreusement accueillie dans son laboratoire et m'a permis de réaliser mes expérimentations dans d'excellentes conditions. Son accueil chaleureux, ses conseils avisés et la confiance qu'il m'a accordée ont été des éléments essentiels dans l'aboutissement de ce projet.

Je tiens également à exprimer mes sincères remerciements à M. BENABDELMOUMEN Djilai pour sa disponibilité, ses encouragements et son aide précieuse. Son expérience et sa bienveillance ont été pour moi une réelle source d'enrichissement.

Je n'oublie pas d'adresser mes plus vifs remerciements à Khawla, doctorante au laboratoire, pour son aide, sa patience et sa précieuse collaboration. Sa gentillesse et son soutien constant m'ont beaucoup aidée au cours des travaux pratiques.

Enfin, j'exprime toute ma gratitu de à Fatima, la technicienne du laboratoire, pour son assistance, sa disponibilité et sa bonne humeur quotidienne, qui ont rendu mon travail plus agréable et motivant.

À toutes ces personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire, je vous adresse mes sincères remerciements et ma profonde reconnaissance.

Dédicaces

Je dédie ce travail en premier lieu à Allah, source de toute force et de toute sagesse. C'est grâce à Sa volonté et à Sa miséricorde que j'ai pu surmonter les épreuves, garder la patience et trouver le courage nécessaire pour mener à bien ce parcours. Dans les moments de doute comme dans les moments de joie, Il a toujours été ma lumière, ma protection et ma plus grande inspiration. Qu'Il soit à jamais loué pour les bienfaits qu'Il m'a accordés.

À ma chère mère, Aucune parole ne saurait exprimer toute ma gratitude et mon amour pour toi. Tu es ma raison d'être, ma force et mon refuge. Ton amour inconditionnel, tes prières silencieuses, tes sacrifices et ton soutien indéfectible m'ont guidée dans les moments les plus difficiles. C'est à toi que je dois tout ce que je suis aujourd'hui. Ce travail est le fruit de tes efforts, de ton courage et de ta patience. Qu'Allah te protège et te comble de bonheur comme tu as comblé ma vie d'amour.

À l'âme de mon père , Ton absence physique n'a jamais effacé ta présence dans mon cœur. Tes souvenirs, ton amour et tes conseils résonnent encore en moi chaque jour. Je ressens ta bienveillance dans chacun de mes pas, et c'est à ta mémoire que je dédie cette réussite. J'espère de tout cœur que là où tu es, tu es fier de moi et que mon parcours t'honore.

À mes frères Azeddine et Walid, Merci pour votre affection, votre présence et vos encouragements constants. Vous avez toujours cru en moi, même quand moi-même je doutais. Votre soutien m'a donné la force d'avancer, et votre confiance a été un moteur dans les moments les plus exigeants. Vous êtes bien plus que des frères, vous êtes mes piliers, mes alliés et mes modèles.

À ma sœur et son mari, Merci pour votre bienveillance, vos mots réconfortants et votre soutien dans les moments où j'en avais le plus besoin. Votre encouragement m'a aidée à garder espoir et à aller jusqu'au bout de ce projet. Votre présence à mes côtés a été d'un grand réconfort.

À celui qui occupe une place particulière dans mon cœur, dont la présence discrète mais constante m'a apporté une force inestimable. Merci pour ton soutien infaillible, ta patience et tes encouragements qui m'ont accompagnée à chaque étape de ce travail. Ta gentillesse et ton réconfort ont ajouté une lumière précieuse à ce parcours.

À ma chère amie Halima, Aucune phrase ne suffira jamais à décrire tout ce que tu représentes pour moi. Tu as toujours été là, dans les bons comme dans les mauvais moments, avec ton cœur immense, ton écoute et ton soutien sans faille. Tu m'as encouragée, aidée, motivée et accompagnée avec tant de sincérité et d'amitié. Ce travail est aussi le tien, car sans toi, ce parcours n'aurait pas eu la même saveur ni la même force. Merci pour tout ce que tu as fait pour moi, du fond du cœur.

Et enfin, À tous mes amis, ceux qui de près ou de loin ont partagé mes joies, mes fatigues, mes doutes et mes réussites. Merci pour vos sourires, vos mots d’encouragement et vos gestes de soutien. Vous avez tous contribué, à votre manière, à rendre ce chemin plus doux et plus lumineux.

Résumé :

L'objectif de cette étude était d'évaluer l'effet de l'ajout de mucilages et pectines extraits des graines de Foeniculum vulgare en tant qu'additifs naturels sur la qualité physico-chimique, la stabilité et la microbiologie d'un yaourt fonctionnel enrichi en probiotiques. Les yaourts ont été préparés à partir de lait selon un procédé standard de fermentation, puis répartis en plusieurs lots expérimentaux auxquels ont été ajoutés des extraits de fenouil (mucilage et pectine) à des taux croissants. Des analyses physico-chimiques et microbiologiques ont été réalisées tout au long de la période de stockage à 4 °C pendant 15 jours.

Les résultats ont montré que l'intégration des mucilages et pectines de fenouil stimule lacroissance et la viabilité des bactéries probiotiques, tout en maintenant un pH stable autour de 4,4 à 4,6 et en favorisant une augmentation progressive de l'acidité jusqu'à environ 97 °D, illustrant une fermentation contrôlée et une bonne stabilité du produit. L'ajout des extraits a également contribué à améliorer la texture et la viscosité des yaourts, assurant une meilleure tenue pendant le stockage.

Sur le plan microbiologique, les extraits de fenouil ont permis de prévenir la prolifération des micro-organismes indésirables tout en soutenant la croissance des bactéries lactiques bénéfiques, confirmant leur rôle de prébiotique naturel. Ces résultats mettent en évidence le potentiel des mucilages et pectines de fenouil pour améliorer la qualité, la stabilité et la valeur fonctionnelle des yaourts enrichis en probiotiques, offrant une base solide pour le développement de produits laitiers sains et innovants.

Mots-clés : Foeniculum vulgare, mucilages, pectines, yaourt fonctionnel, probiotiques, microbiologie, qualité, conservation.

Abstract:

The objective of this study was to evaluate the effect of adding mucilages and pectins extracted from Foeniculum vulgare seeds as natural additives on the physicochemical quality, stability, and microbiological characteristics of a functional yogurt enriched with probiotics. The yogurts were prepared from cow's milk following a standard fermentation process and divided into several experimental batches supplemented with increasing levels of fennelextracts. Physicochemical and microbiological analyses were carried out during storage at 4°C for 15 days.

The results revealed that the incorporation of fennel mucilages and pectins stimulated the growth and viability of probiotic bacteria while maintaining a stable pH ranging from 4.4 to 4.6 and a progressive increase in acidity reaching about 97 °D, indicating a controlled fermentation and good product stability. The addition of these extracts also improved yogurt texture and viscosity, ensuring better consistency during storage.

Microbiologically, the fennel extracts inhibited the proliferation of undesirable microorganisms while promoting the growth of beneficial lactic acid bacteria, confirming their role as natural prebiotics. These findings highlight the potential of fennel-derived mucilages and pectins to enhance the quality, stability, and functional value of probiotic- enriched yogurts, providing a promising base for the development of healthy and innovative dairy products. **Keywords:** Foeniculum vulgare, mucilages, pectins, functional yogurt, probiotics, microbiology, quality, preservation.

الملخص

يهدف هذا البحث إلى تقييم تأثير إضافة المواد المخاطية والبكتينات المستخلصة من بذور الشمر (فونيكولوم فولغار) كمضافات طبيعية على الجودة الفيزيائية والكيميائية، والاستقرار، والخصائص الميكروبيولوجية لليوغورت الوظيفي المدعّم بالبروبيوتيك. تم تحضير الياغورت من حليب الأبقار وفق عملية تخمير معيارية، ثم قُسّمت العينات إلى عدة دفعات تجريبية أُضيفت إليها مستخلصات الشمر بنسب متزايدة. أُجريت التحاليل الفيزيائية والكيميائية والميكروبيولوجية خلال فترة التخزين عند درجة حرارة 4°C لمدة خمسة عشر (15) يوماً.

أظهرت النتائج أن دمج المواد المخاطية والبكتينات المستخلصة من الشمر حفّز نمو وبقاء البكتيريا البروبيوتيكية، مع الحفاظ على قيمة pH مستقرة تراوحت بين 4.4 و4.6، وزيادة تدريجية في الحموضة وصلت إلى حوالي 97 درجة دورنيك، مما يدل على تخمير مضبوط واستقرار جيد للمنتج. كما ساهمت الإضافات في تحسين القوام واللزوجة، مما منح المنتج ثباتاً أفضل أثناء التخزين.

من الناحية الميكروبيولوجية، أظهرت المستخلصات قدرة على الحد من نمو الكائنات الدقيقة غير المرغوب فيها، مع تعزيز نمو البكتيريا اللبنية المفيدة، مؤكدةً بذلك دورها كمكوّن بريبيوتي طبيعي. تُبرز هذه النتائج الإمكانات العالية للمواد المخاطية والبكتينات المستخلصة من الشمر في تحسين جودة واستقرار وقيمة الياغورت الوظيفي المدعّم بالبروبيوتيك، مما يفتح آفاقاً لتطوير منتجات ألبان صحية ومبتكرة.

الكلمات المفتاحية: الشمر، المواد المخاطية، البكتينات، يوغورت وظيفي، بروبيوتيك، ميكروبيولوجيا، جودة، حفظ.

Listes des abréviations :

FAO : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture.

OMS : Site officiel de l'Organisation mondiale de la Santé.

USDA : Département de l'Agriculture des États-Unis.

USA : États-Unis.

UFC : Unité formant colonie.

Na OH : Hydroxyde de sodium.

Na cl : Chlorure de sodium.

SM : Solution mère.

***F. vulgare* :** *Foeniculum vulgare.*

FOS : Fructo-oligosaccharides.

m/v : Masse / Volume.

M.S : Matière sèche.

Eq : Equivalent.

DNS : Acide 3,5-dinitrosalicylique.

MHDP : méta-hydroxydiphényle.

FGS : Fluide gastrique stimulé.

%R : Pourcentage de résistance.

%H : Pourcentage d'hydrolyse.

MRS : Milieu MRS agar .

°D : Degré Dornic.

Listes des figures :

Figure 1 : Foeniculum vulgare 6
Figure 2: Les graines de fenouil brutes (a) et séchées (b). 7
Figure 3 :La structure de la pectine 14
Figure 4 : Aspect des cellules de Lb. Bulgaricus sous le microscope électronique 21
Figure 5 : Aspect des cellules de St. thermophilus sous le microscope électronique. 22
Figure 6 : Proto-coopération entre St. thermophilus et Lb. Bulgaricus. 23
Figure 7 :Diagramme général du procédé de fabrication du yaourt 27
Figure 8 :Etapes d'extraction de mucilage des graines de fenouil 37
Figure 9 : Etapes d'extraction de pectine des graines de fenouil. 38
Figure 10 :Développement de la coloration lors du dosage des sucres totaux 40
Figure 11 : Préparation du réactif DNS (dinitrosalicylique) 41
Figure 12 : Culot formé après la centrifugation de la souche probiotique 44
Figure 13 : Yaourts en cours de fermentation dans l'étuve 45
Figure 14 : Yaourts après 6h de Fermentation prêts à être stockés au réfrigérateur 46
Figure 15 : Evaluation du pH de yaourts 47
Figure 16 :Evaluation de l'acidité titrable du yaourt 48
Figure 17 : Préparation des dilutions décimales de yaourt 49
Figure 18 :Incubation des boîtes de Pétri en anaérobiose 50
Figure 19 :Rendement d'extraction des mucilages et de la pectine des grains de fenouil% 52
Figure 20 : Teneur en sucres totaux (µg/mL) du mucilage et de la pectine 53
Figure 21 :Teneur en acides uroniques (µg/mL) du mucilage et de la pectine 54
Figure 22 :Évolution des populations de Streptococcus thermophilus dans le yaourt réfrigéré à 4 °C pendant 15 jours 58
Figure 23 :Évolution des populations de Lactobacillus bulgaricus dans le yaourt réfrigéré à 4 °C pendant 15 jours 59
Figure 24 :Évolution des populations de Lactobacillus plantarum dans le yaourt réfrigéré à 4 °C pendant 15 jours 61
Figure 25 :Évolution du pH de 6 lots pendant 15jours de stockage. 62
Figure 26 :Évolution d'acidité des 6 lots pendant 15jours de stockage 63
Figure 27 :Évolution de viscosité de 6 lots pendant 15jours de stockage 64

Listes des tableaux :

Tableau 1 : Classification du fenouil 6
Tableau 2 :TNutriments contenus dans le fenouil séché ,. 8
Tableau 3 :Principales espèces microbiennes utilisées comme probiotiques 33
Tableau 4 :Les principaux effets bénéfiques attribués aux probiotiques. 34
Tableau 5 : Composition des lots expérimentaux de yaourt 44
Tableau 6 : Quantité de pectine et de mucilage ajoutée dans chaque lot. 45

Tables des matières :

REMERCIEMENTS

DEDICACES

RESUME

ABSTRACT

الملخص

LISTES DES ABREVIATIONS

LISTES DES FIGURES

LISTES DES TABLEAUX

Introduction 1

Partie 1: Synthèse bibliographique 3

Chapitre I : Présentation de la plante (Foeniculum vulgare) 4

Partie 1 : Synthèse bibliographique. **..... 5**

1. Généralités : 5
2. Utilisation : 5
3. Description botanique : 5
4. Taxonomie et classification : 6
5. Origine, distribution géographique : 6
6. Composition chimique : 7
7. Utilisations modernes et pharmacologiques : 9
8. Toxicité : 9

9.Intérêt nutritionnel et santé : 9

Chapitres II11: Les mucilages, les pectines et l'activité prébiotique..... 11

1. Les mucilages : 12

1.1 Définition des mucilages : 12

1.2. Les propriétés fonctionnelles : 12

1.3. Applications alimentaires et biologiques des mucilages : 12

2. Les pectines : 13

2.1. Définition des pectines : 13

2.2. Localisation des pectines : 13

2.3. Structure de la pectine : 14

2.4. Composition : 14

2.5. Propriétés physico-chimiques : 15

2.5.1. Solubilité et précipitation : 15

2.5.2. Stabilité et dégradation : 15

2.5.3. Viscosité : 15
2.4.4. Emulsification : 15
2.5.4 Gélification : 16
3. Les prébiotiques : 16
3.1. Définition : 16
3.2. Effets des prébiotiques : 16
3.2.1. Effets entre les prébiotiques : 16
3.3. Rôle des prébiotiques : 17
3.4. Effets indésirables des prébiotiques : 17
3.5. Utilisation des prébiotiques en alimentation humaine : 17
4. Symbiotique : 18
Chapitre III : les yaourts et les probiotique 19
1. Le yaourt : 20
1.1. Historique : 20
1.2. Définition : 20
1.3. Les Bactéries spécifiques du yaourt : 21
1.3.1. L'espèce Lactobacillus bulgaricus : 21
1.3.2. L'espèce *Streptococcus thermophilus :* 21
1.4. La proto-coopération entre *St. thermophilus* et *Lb. Bulgaricus :* 22
1.5. Aptitudes technologiques des bactéries lactiques du yaourt : 24
1.5.1. Aptitude acidifiante : 24
1.5.2. Aptitude protéolytique : 24
1.5.3. Aptitude texturante : 24
1.5.4. Aptitude aromatisante : 25
1.5.5. Aptitude lipolytique : 25
1.5.6. Aptitude antagonistique : 25
2. Technologie de fabrication : 26
2.1. Standardisation du mélange : 28
2.2. Traitement thermique : 28
2.3. Ensemencement : 29
2.4. Fabrication de levain lactique : 29
2.5. Conservation de levain : 29
2.6. Rôle et propriétés des levains lactiques : 29
2.7. Réchauffage : 30
2.8. Etuvage / brasage : 30
2.8.1. Phase d'incubation (étuvage) : 30
2.8.2. Brassage : 31

3. Intérêt santé de yaourt : 31
4. Les probiotiques : 32
4.1. Définition : 32
4.2. Classification des probiotiques : 32
4.2.1. Les bactéries lactiques : 32
4.2.2. Les bactéries non lactiques : 32
4.2.3. Levures du genre Saccharomyces : 32
5. Probiotiques et santé : 33
Partie 02 : Partie expérimentale
1. Objectifs 36
2. Matériel et méthodes 36
2.1 Origine de la matière première 36
3. L'extraction des mucilages et pectines 37
3.1 L'extraction des mucilages 37
4. Analyses effectuées 39
4.1. Dosage des sucres totaux 39
4.2. Dosage des sucres réducteurs 40
4.3. Dosage des acides uroniques 41
4.4. Protocole résistance d'acidité gastrique 42
5. Cinétique et activité prébiotique 43
6. Protocole d'incorporation des pectines et mucilages dans un yaourt probiotique 43
7. Les tests physico-chimiques et microbiologiques 46
7.1. Les tests physico-chimiques 46
7.1.1. pH 46
7.1.2. L'acidité titrable 47
7.1.3 Préparation des dilutions décimales de yaourts 48
7.1.4 Dénombrement des *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *b*ulgaricus 49
7.1.5 Dénombrement de *Streptococcus thermophilus* 50
7.1.6 Dénombrement de *Lactobacillus plantarum* 50
Partie 3 : Résultats et discussion 51
1. Rendement de mucilage et pectine 52
2. Dosage des sucres totaux 53
3. Dosage des acides uroniques 54
4. Résistance à l'acidité gastrique 55
4.1 Mucilage 55
4.2 Pectine 55
5. Cinétique et activité prébiotiques : 56

6. Résultats des analyses microbiologiques 58
6.1. Résultats de l'évolution de *Streptococcus thermophilus* 58
6.2. Résultat de l'évolution de *Lactobacillus bulgaricus* 59
6.3. Résultat de l'évolution de *Lactobacillus plantarum* 61
7. Résultats des analyses physicochimiques 62
7.1 pH 62
7.2. Acidité titrable 63
7.3. Viscosité 64
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Introduction

Introduction

Les aliments fonctionnels représentent aujourd'hui un domaine central de la recherche en nutrition et en agroalimentaire, en raison de leur capacité à améliorer la santé humaine au-delà de la simple valeur nutritive. Parmi ces aliments, les produits laitiers fermentés, tels que le yaourt, constituent une matrice idéale pour l'intégration de composés bioactifs, grâce à leur popularité, leur composition nutritionnelle et leur potentiel à supporter la croissance de bactéries bénéfiques. Cependant, la stabilité et la viabilité des probiotiques dans ces produits restent un défi majeur pour garantir leurs effets sur la santé.

Les probiotiques, définis par le FAO/OMS (2002) comme des micro-organismes vivants conférant un bénéfice pour la santé lorsqu'ils sont administrés en quantité adéquate, sont sensibles aux conditions de stockage et aux contraintes du processus de fabrication. Pour améliorer leur survie et leur activité, l'utilisation de prébiotiques, substances non digestibles capables de stimuler sélectivement la croissance des bactéries bénéfiques, s'avère essentielle (Roberfroid, 2007 ; Vamanu et al., 2018).

Les mucilages et pectines, polysaccharides naturels extraits de graines de plantes aromatiques, représentent des prébiotiques particulièrement intéressants. Le fenouil (Foeniculum vulgare Mill.), plante largement cultivée et utilisée en Algérie, est riche en mucilages et pectines ainsi qu'en composés bioactifs tels que flavonoïdes et acides phénoliques, conférant à ses graines des propriétés antioxydantes et prébiotiques (Barros et al., 2009 ; Kooti et al., 2015 ; Rather et al., 2016). Ces polysaccharides peuvent protéger les bactéries probiotiques, améliorer la texture et la viscosité des yaourts, et contribuer à la stabilité microbiologique du produit.

Dans ce cadre, le présent travail expérimental vise à étudier l'effet de l'intégration des mucilages et pectines extraits des graines de fenouil dans des yaourts fonctionnels enrichis en probiotiques, afin d'évaluer leurs effets sur la viabilité des bactéries, les propriétés physico- chimiques et la qualité générale du produit.

Ce mémoire est structuré en trois parties complémentaires :

Une revue bibliographique présentant les concepts liés aux yaourts fonctionnels, aux probiotiques et prébiotiques, ainsi que les caractéristiques des mucilages et pectines de fenouil.

Une partie expérimentale, détaillant le matériel, les méthodes d'extraction et d'intégration, ainsi que les analyses effectuées.

Une interprétation et discussion des résultats, visant à analyser les observations obtenues au cours de l'étude et à en tirer des conclusions scientifiques.

Partie 1
Synthèse bibliographique

Chapitre I

Présentation de la plante **(Foeniculum vulgare)**

Partie 1 : Synthèse bibliographique.

1. Généralités :

Le fenouil *(Foeniculum vulgare)*, une plante médicinale et aromatique de la famille des Apiacées (Anciennement appelées *Ombellifères*), est reconnu et exploité par l'humanité depuis l'antiquité. Sa culture s'est diffusée à travers les pays méditerranéens, en grande partie en raison de ses propriétés gustatives appréciées. De plus, un regain d'intérêt pour les produits d'origine naturelle, en contraste avec les agents synthétiques, a recentré l'attention sur les végétaux en tant que précieuses sources de composés aromatiques. **(Oktay et *al.*, 2003)**.

2. Utilisation :

L'utilisation du fenouil remonte à environ 3000 ans avant notre ère, période à laquelle il était déjà apprécié à Babylone. Les Égyptiens en avaient également connaissance, mais ce sont surtout les Grecs qui lui attribuèrent une réputation particulière, le considérant comme une véritable panacée, promesse de jeunesse, de vitalité et de santé. Les Arabes et les Chinois ont également intégré le fenouil dans leurs pratiques médicinales. Des références à cette plante apparaissent dans divers ouvrages médiévaux dédiés aux plantes aromatiques. Au XVIe siècle, les Anglais préparaient une boisson très recherchée, appelée « sack », souvent préconisée comme antidote contre les piqûres de scorpions et les morsures de serpents **(Teuscher, 2005).**

3. Description botanique :

Foeniculum vulgare Mill. est une plante herbacée bisannuelle ou vivace, capable d'atteindre une hauteur maximale de 2,5 mètres, caractérisée par des tiges creuses et ramifiées. Ses feuilles sont composées de trois à quatre folioles, agencées en lanières filiformes d'environ 0,5 mm de largeur. Les fleurs, de couleur jaune, se regroupent en ombelles. Quant au fruit, il prend la forme d'une graine sèche mesurant entre 4 et 10 mm de long **(Rather et *al.*, 2012)**.

Figure 1 : Foeniculum vulgare (Badgujar et al., 2014).

4. Taxonomie et classification :

La classification actuelle des fenouils est basée sur leur utilisation Il existe une seule espèce du fenouil (*Foeniculum vulgare* Mill) Cette espèce se subdivise en deux sous-espèces : *vulgare* et *piperitum* **(Muckensturm et *al*.,1997).**

Tableau 1 : Classification du fenouil (Badgujar et al., 2014).

Règne	***Plantae***
Division	*Tracheophyta*
Subdivision	*Spermatophytina*
Classe	*Magnoliopsida*
Ordre	*Apiales*
Famille	*Apiaceae*

5. Origine, distribution géographique :

Le fenouil (*Foeniculum vulgare* Mill) est originaire de la région méditerranéenne **(Zoubiri et *al*, 2014)**. Il est généralement considéré comme une espèce indigène des rives de la mer Méditerranée, mais il s'est largement naturalisé dans diverses régions du monde, notamment sur les sols arides, à proximité de la côte et sur les rives des rivières **(Manzoor et *al*., 2012)**. Sa culture s'est également étendue en Russie, en Inde, en Chine et au Japon **(Zoubiri et *al*., 2014).**

6. Composition chimique :

D'après les données de l'USDA, le fenouil figure parmi les meilleures sources végétales de potassium, sodium, phosphore et calcium. Il est généralement cultivé pour ses fruits ou ses graines comestibles. Ils sont sucrés et secs. On a souvent recours au séchage du fruit pour une utilisation future, et ce fruit séché, connu sous le nom de « graine de fenouil », constitue un produit commercial crucial **(Badgujar et *al.*, 2014)**. La composition des graines de fenouil se répartit comme suit : 6,3 % d'eau, 9,5 % de protéines, 10 % de matières grasses, 13,4 % de minéraux, 18,5 % de fibres et 42,3 % d'hydrates de carbone **(Rather et *al.*, 2012)**. Ses feuilles recèlent des vitamines et minéraux comme le calcium, le potassium, le sodium, le fer, le phosphore et la thiamine la riboflavine, la niacine et la vitamine C **(Miguel et *al.*, 2010).** Les cotylédons des graines renferment 10 à 12 % d'huile présente dans les fruits. L'huile extraite du fruit du fenouil renferme 4 % d'acide palmitique, 22 % d'acide oléique, 14 % d'acide linoléique et 6 % d'acide pétrocyclique. Le fruit contient entre 4 et 6% d'essence, dont la composition et les ingrédients fluctuants dépendent de l'endroit où la plante a été cultivée **(Ahmadi et *al.*, 2007).** L'arôme distinctif du fenouil provient de son huile essentielle. L'huile essentielle de fenouil renferme plus de 30 variétés de composés terpéniques, parmi lesquels les principaux sont le trans-anéthole (qui représente entre 50 et 80 %), le fenshon (8%) et le limonène (5%) **(Tableau 2) (Salehi , 2006).**

(a) **(b)**

Figure 2: Les graines de fenouil brutes (a) (Badgujar et al., 2014) et séchées (b) (Gani et al., 2019).

Tableau 2 :TNutriments contenus dans le fenouil séché (USDA, USA) (Badgujar et al,.

Composition	**Quantité pour (100g)**
Proximates	
Humidité	90,21 g
Energie	31 kcal
Protéines	1,24 g
Lipides totaux (matières grasses)	0,2 g
Glucides	7,3 g
Fibres alimentaires totale	3,1 g
Sucres	3,93 g
Minéraux	
Calcium (Ca)	49 mg
Fer (Fe)	0,73 mg
Magnésium (Mg)	17 mg
Phosphore (P)	50 mg
Potassium (K)	414 mg
Sodium (Na)	52 mg
Zinc (Zn)	0,2 mg
Vitamines	
Vitamine C	12mg
Thiamine B-1	0,01mg
Riboflavine B-2	0,032 mg
Niacine B-3	0,64 mg
Vitamine B-6	0,047 mg
Folate	27 µg
Vitamine A	47 µg
Vitamine E	0,58 mg
Vitamine K	62,8 µg
Lipides	
Acides gras, saturé totaux	0,09 g
Acides gras, monoinsaturés totaux	0,068 g
Acide gras, polyinsaturé totaux	0,169 g
Acide Aminés essentiels	
Leucine	0,63 g
Isoleucine	0,73 g
Phenylanine	0,45 g
Tryptophane	0,53 g
Acide aminés non essentiel	
Glycine	0,55 g
Proline	0,53 g

7. Utilisations modernes et pharmacologiques :

Foeniculum vulgare Mill présente diverses propriétés pharmacologiques citées aussi bien dans la médecine traditionnelle iranienne que dans la phytothérapie contemporaine, parmi celle-ci figure des activités antioxydantes, cytotoxiques, anti-inflammatoires, antimicrobiennes, bronchodilatatrices, œstrogéniques, diurétiques, lithotritiques, galactagogues, emménagogues, antithrombotiques, hypotensives et gastroprotectrices. De plus, il contribuerait à l'amélioration de la mémoire et possèderait des propriétés antimutagènes. *F. vulgare* n'a pas montré d'effets néfastes majeurs, hormis quelques incidents de réactions allergiques **(Rahimi et Ardekani, 2013)**. Par ailleurs, l'huile essentielle (H.E) de fenouil démontre une action larvicide importante contre deux espèces de moustiques en Thaïlande (*Anopheles dirus* et *Aedes aegypti*) **(Pitasawat et *al.*, 2007).**

8. Toxicité :

Aucune toxicité sévère ni effets secondaires n'ont été rapportés suite à la consommation de fenouil, à l'exception de quelques cas de réactions allergiques tels que l'asthme et la rhinite liés à l'ingestion des fruits.

Il a toutefois été signalé que l'estragole (méthylchavicol), l'un des composants majeurs, présente une activité cancérigène chez l'animal. Néanmoins, le métabolisme de ce composé diffère entre l'homme et l'animal, tout comme les effets secondaires qui diffèrent considérablement selon qu'il est administré sous forme isolée ou intégré à une matrice naturelle complexe, comme dans les extraits ou préparation à base de fenouil **(Rahimi et Ardekani, 2013).**

Intérêt nutritionnel et santé :

Le bulbe, les feuilles et les graines de fenouil sont des potentiels réservoirs de divers nutriments et sont couramment employés à la fois en version crue et cuite dans une multitude de recettes (salades, pâtes, plats de légumes, etc.) **(Farrell, 1999)**. Le bulbe cru renferme des glucides, des fibres alimentaires, des protéines, des vitamines B, de la vitamine C et divers minéraux indispensables, ce qui le positionne comme un élément nutritif intéressant **(Farrell, 1999).**

Le fenouil est spécialement riche en fibres, ce qui aide à réduire le niveau de cholestérol **(Malhotra, 2012)**. Ses feuilles présentent une activité antioxydante notable, renforçant son attrait pour la prévention des maladies associées au stress oxydatif **(Malhotra, 2012).**

Les graines, au goût d'anis caractéristique, sont exploitées pour l'extraction de l'huile essentielle. Les fleurs et feuilles sont également utilisées pour leur pouvoir colorant jaune-brun **(Malhotra, 2012).**

Chapitres II

Les mucilages, les pectines et l’activité prébiotique

1. Les mucilages :

1.1 Définition **des mucilages :**

Les mucilages sont des polysaccharides complexes, de structure ramifiée, contenant des proportions variables d'arabinose, de D-galactose, de L-rhamnose et de D-xylose, ainsi que d'acide galacturonique dont la taille et la composition peuvent différer d'une espèce végétale à une autre **(Sepulveda et *al*., 2007).** Ils présentent une composition hétérogène, et forment des solutions visqueuses caractéristiques au contact de l'eau **(Varsha et *al*., 2010).** Les mucilages sont présents dans différentes parties de la plante **(Deogade et *al*., 2012).** Grâce à leurs propriétés physicochimiques, leurs applications sont nombreuses, ils peuvent être utilisés dans les aliments, les produits pharmaceutiques et cosmétiques pour des utilisations comme des modificateurs de texture, des épaississants, des gélifiants et ou encore des agents liants **(Deore et Khadabadi, 2008 ; Koocheki et *al*., 2009 ; Lai et Liang, 2012).**

1.2. Les propriétés fonctionnelles :

Les mucilages possèdent des propriétés fonctionnelles intéressantes, telles qu'une forte capacité de rétention d'eau, un pouvoir gélifiant et une activité émulsifiante. Ces caractéristiques expliquent leur utilisation dans l'industrie agroalimentaire comme agents épaississants, stabilisants et systèmes d'encapsulation. A titre d'exemple, les propriétés rhéologiques du mucilage de lin et son intégration dans les compositions alimentaires enrichies en fibres ont fait l'objet de nombreuses recherches **(Lorenc, 2024).**

1.3. Applications alimentaires et biologiques des mucilages :

Au-delà de leur importance technologique, les mucilages ont un rôle biologique crucial en tant que composés fibreux solubles. Ils jouent un rôle prébiotique en favorisant le développement de bactéries bénéfiques du microbiote intestinal, comme les lactobacilles et les bifidobactéries. Cette caractéristique leur confère une importance particulière dans l'élaboration de produits nutraceutiques et symbiotiques, notamment les yaourts fonctionnels **(Kassem et *al*., 2021).**

2. Les pectines :

2.1. Définition des pectines :

Il est actuellement reconnu que la pectine est une macromolécule hétérogène constituée de **plusieurs** domaines **structuraux** dont la proportion et la structure peuvent varier selon la source botanique, l'organe végétal concerné, le type cellulaire, le stade de développement ainsi que de sa localisation précise dans la paroi cellulaire **(Voragen et *al.*, 2009).**

Dans le domaine de la confiserie, il s'agit du troisième agent gélifiant le plus employé, après l'amidon et la gélatine. La pectine joue également un rôle colloïdal protecteur, augmentant la viscosité et disposant de propriétés remarquables pour la fixation et la libération des arômes **(Schrieber et Gareis, 2007).**

La pectine commerciale est utilisée comme gélifiant, épaississant, stabilisant et émulsifiant dans une grande variété de produits alimentaires tels que les confitures, les boissons lactées acides, les glaces ou encore les vinaigrettes. La structure fine de la pectine influence significativement sa fonctionnalité et ses applications **(Willats et *al*., 2006).**

2.2. Localisation des pectines :

La localisation des pectines varie en fonction des espèces de plantes. Elles sont largement conservées chez les algues chlorophycées ainsi que chez les plantes angiospermes **(Popper et Fry, 2003).**

Les pectines affichent des motifs dynamiques au sein des parois cellulaires au cours de la croissance **(Haas et *al.*, 2020)**. De même, le marquage en pulse de RG-I **(Rhamnogalacturonane I)** indique une transition d'un motif diffus à un motif fibrillaire associée à une extension cellulaire **(Anderson et *al*., 2012).**

De manière générale, les pectines sont principalement concentrées dans la lamelle médiane, située entre les parois des cellules voisines **(Daher et Braybrook, 2015).** On les retrouve également, de façon moins régulière, dans la lamelle moyenne des parois cellulaires du bois, là ou la lignification débute lors du développement secondaire du xylème **(Wi et *al*., 2005).**

Enfin, les fruits constituent des sources majeurs de pectines pouvant être extraites. Par ailleurs, elles constituent la majeure partie du mucilage, qui est principalement composé de RG-I **(Francoz et *al*., 2015).**

2.3. Structure de la pectine :

La pectine est une substance provenant exclusivement de sources végétales **(Ridley et *al.*, 2001).** Ce sont des polysaccharides qui se composent d'une chaîne principale d'acide galacturonique et d'une chaîne secondaire ramifiée **(Figure 03)**.

La chaîne principale est formée d'acide D-galacturonique (D-Gal A) connecté par des liaisons glycosidiques α (1→4). Des molécules de rhamnose s'immiscent régulièrement entre ces monomères par des liaisons α (1→2) **(Wicker et *al.*, 2014).**

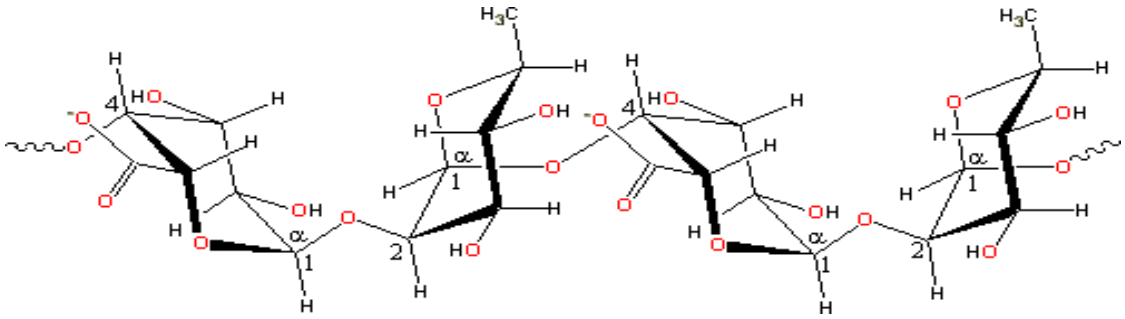


Figure 3 :La structure de la pectine (Tilly, 2010)

2.4. Composition :

Majoritairement, les unités d'acide galacturonique représentent en moyenne 65 % du poids des pectines. Le groupe carboxylique de cet acide peut se présenter sous forme libre ou sous forme d'un sels (avec le sodium, le potassium, le calcium ou l'ammonium) ou sous forme estérifiée par le méthanol. Toutefois, les pectines proviennent de la dégradation des protopectines, des structures plus complexes et se trouvent dans le tissu végétal. Ces derniers contiennent une variété de sucres neutres, tels que le rhamnose dans la chaîne principale, le galactose, l'arabinose et des proportions réduites d'autres sucres formant des chaînes latérales **(Endreû et *al.*, 2009).**

Les régions riches en acide galacturonique sont constituées d'un mélange d'esters méthyliques, d'acide libre et de sels dérivés du groupe carboxyle de l'acide **(Christensen et Kelco, 2009)**.

2.5. Propriétés physico-chimiques :

2.5.1. Solubilité et précipitation :

Plusieurs facteurs déterminent la solubilité de la pectine : la température, le poids moléculaire, le degré de ramification, le niveau d'estérification méthylique et la répartition des groupes esters méthyliques. La pectine se dissout dans l'eau, créant une solution colloïdale opalescente, mais elle est insoluble dans l'éthanol. Ainsi, plus une pectine possède une masse moléculaire faible, une structure fortement ramifiée et possède des fonctions carboxyliques impliquées dans l'estérification au méthanol, plus sa solubilité est importante (**Thibault et *al.*, 1991).**

2.5.2. Stabilité et dégradation :

L'hydrolyse ou la dépolymérisation peut avoir lieu sous des conditions spécifiques de pH et de température. D'autre part, des réactions de désestérification peuvent se produire à une température inférieure à 10°C, tandis qu'à des températures plus élevées ce processus devient prédominant et accélère la dépolymérisation, pouvant aller jusqu'à la dégradation complète du polymère. Les pectines restent toutefois relativement stables dans des environnements acides **(Morris et *al.*, 2002).**

2.5.3. Viscosité :

La viscosité intrinsèque des pectines est principalement influencée par leur masse molaire (MS). Le pouvoir épaississant des pectines peut être évalué grâce à cette viscosité intrinsèque qui reflète le volume hydrodynamique occupé par le polymère **(Yoo et *al.*, 2006).**

Le pouvoir épaississant dépend également des conditions extrinsèques tel que la température, la nature du solvant et le pH **(Hotchkiss et *al.*, 2002; Mesbahi et *al.*, 2005)**.

2.4.4. Emulsification :

On ne considère généralement pas les polysaccharides comme des émulsifiants. Toutefois, les pectines peuvent servir d'agents émulsifiants lorsqu'elles interagissent faiblement avec les ions divalents. La fonction d'un agent émulsifiant consiste à diminuer la tension interfaciale d'une émulsion (huile dans l'eau, eau dans l'huile...) afin de favoriser sa dispersion en fines gouttelettes et assurer ainsi sa stabilité **(Akhtar et *al.*, 2002).**

La capacité émulsifiante des pectines dépend de leurs caractéristiques structurelles et de facteurs externes, tels que la concentration en polymère et le pH de la solution **(Ngouemazong et *al.*, 2015).**

2.5.4 Gélification :

Les pectines possèdent la capacité à former des gels par divers procédés, en fonction de leur niveau de méthylation. Les pectines faiblement méthylées (LM) ont la capacité de se lier fortement aux ions divalents comme le calcium. Dans le cas des pectines amidées (AM), la vitesse de gélification est similaire à celle des pectines LM standard. Toutefois, la présence de groupes amides rend possible la gélification des pectines LM à un pH acide inférieur à 3. Pour les pectines hautement méthylées (HM), la vitesse de formation du gel dépend directement du degré d'estérification (DE) ; lorsque ce paramètre est élevé, la gélification s'effectue plus rapidement **(Capel et *al.*, 2006).**

3. Les prébiotiques :

3.1. Définition :

Gibson et Roberfroid, (1995) ont été les premiers à définir le concept de prébiotique, le décrivant comme un « aliment non digestible exerçant un effet bénéfique sur l'hôte en favorisant la croissance et/ou l'activité d'une ou plusieurs souches bactériennes spécifiques à la flore intestinale ».

Ainsi, cela contribue à améliorer la santé du consommateur. Par la suite, les auteurs ont révisé cette définition comme des « ingrédients fermentés sélectivement, permettant des modifications spécifiques dans la composition et/ou l'activité du microbiote intestinal, apportant ainsi des bénéfices pour la santé et le bien-être de l'hôte. » **(Gibson et *al.*, 2000).**

3.2. Effets des prébiotiques :

3.2.1. Effets entre les prébiotiques :

La consommation d'inuline et de fructooligosaccharides (FOS), à raison d'environ 10 g/jour, favorise la prolifération des bactéries lactiques, en particulier des bifidobactéries, au niveau intestinal. Ces bactéries fermentent les fibres prébiotiques et les transforment en acides gras à chaîne courte (AGCC) tel que l'acétate, le butyrate, le lactate et le propionate **(Miller, 1996).**

Cette fermentation entraîne l'augmentation du gradient osmotique et de la teneur en eau à l'intérieur du côlon, ce qui entraîne une augmentation du poids des selles et un adoucissement de leur texture **(Schmelzle et *al.*, 2003).**

De plus, une diminution du pH des selles favorise la solubilisation accrue des minéraux et oligoéléments tels que le calcium et le magnésium. Des recherches cliniques ont prouvé que

l'assimilation du calcium est significativement améliorée suite à la consommation régulière de prébiotiques **(Van den Heuvel et *al.*, 2005).**

3.3. Rôle des prébiotiques :

De nombreuses recherches ont mis en évidence les effets bénéfiques des probiotiques sur ka santé intestinale. Leur consommation contribue à une amélioration générale de la fonction colique, une diminution de la constipation et de la diarrhée, ainsi qu'une limitation de la prolifération d'agents pathogènes **(Desreumaux et *al.*, 2000).**

Par ailleurs, des études menées sur les humains et les animaux ont montré des progrès encourageants en ce qui concerne l'amélioration de l'absorption des minéraux, notamment du calcium et du magnésium, stimulée par une production augmentée d'acides organiques dans le côlon. Cet effet pourrait avoir une influence bénéfique sur le risque d'ostéoporose et renforcer la solidité des os **(Hulm, 2001 ; Grosdemange, 2014).**

3.4. Effets indésirables des prébiotiques :

Bien qu'ils soient généralement bien tolérés, les prébiotiques peuvent toutefois engendrer des effets secondaires. Effectivement, tant qu'ils n'ont pas subi de métabolisation, ils exercent un effet osmotique au niveau de la lumière intestinale, qui est inversement proportionnel à leur poids moléculaire qui accroît le flux d'eau dans l'intestin, pouvant par conséquent provoquer des borborygmes, des douleurs abdominales et possiblement de la diarrhée. De plus, la fermentation des prébiotiques peut entraîner une production excessive de gaz au niveau du rectum. La fréquence et l'intensité de ces symptômes dépendent de la dose consommée, du mode d'ingestion, mais aussi de la sensibilité individuelle et du profil microbien propre à chaque individu. Toutefois, l'intensité des symptômes demeurent généralement modérés et sans danger pour la santé **(Marteau et *al.*, 2004).**

3.5. Utilisation des prébiotiques en alimentation humaine :

Les prébiotiques se retrouvent dans de nombreux produits alimentaires tels que les produits laitiers, les laits infantiles, les produits de boulangerie, boissons, pâtes alimentaires, pâtes à tartiner, sauces, produits carnés, céréales de petit déjeuner, soupes, confiserie, barres à croquer et desserts **(Hulm, 2001).**

4. Symbiotique :

Le terme « symbiotique » fait référence à la notion de synergie et est exclusivement utilisée pour désigner les produits associant simultanément des probiotiques et des prébiotiques.

On définit les symbiotiques comme des combinaisons de probiotiques et de prébiotiques qui ont des effets positifs sur l'hôte en favorisant la survie, la croissance et l'activité des microorganismes probiotiques dans le tubes digestif **(Andersson et *al*., 2001 ; Isolauri et *al*., 2002).**

Ces associations peuvent générer des effets indépendants ou synergiques, ce qui souligne leur importance dans la formulation de compléments ou d'aliments fonctionnels **(WGO, 2008).**

Le prébiotique peut stimuler la croissance du probiotique, amplifiant ainsi les effets bénéfiques de ce dernier sur la santé **(Clerc et Pinna, 2007).**

Chapitre III
Les yaourts fonctionnels et les probiotiques

1. Le yaourt :

1.1. Historique :

Dans leur quête de conservation du lait sur une longue durée, les premiers fermiers ont mené de nombreux essais, allant de la simple fermentation du lait à la maîtrise de la fermentation lactique. Ce savoir-faire représente aujourd'hui un avantage majeur dans le développement technologique et industriel **(Treillon, 2000).**

L'étymologie du mot yaourt trouve son origine en Asie (yoghourt ou yogourt), dérivant du terme turc « yoghurmark » qui signifie « épaissir » **(Tamime et Deeth, 1980).**

Historiquement, le yaourt dit « nature » et ferme représentait la majorité des productions de laits fermentés. Dans les années 1960-1970, de nouvelles variétés sucrées, puis aromatisées ou aux fruits ont vu le jour, devenant rapidement dominantes sur le marché. L'apparition du yaourt brassé a également marqué une autre avancée significative dans la mise en marché des laits fermentés. Aujourd'hui, l'expansion commerciale du secteur des yaourts probiotiques illustre la demande croissante des consommateurs pour des aliments à valeur fonctionnelle **(Mahaut et *al*., 2003).**

1.2. Définition :

Le yaourt est un produit laitier coagulé obtenu par la fermentation lactique, à partir de deux ferments distincts ensemencés simultanément : *Streptococcus thermophilus* et *Lactobacillus bulgaricus*. Ces microorganismes, naturellement présents dans le lait, excluant ainsi toute autre bactérie. Ces bactéries doivent demeurer vivantes à une concentration de 10^7/g du produit. Elles sont également thermophiles et transforment le lactose en acide lactique à une température de 45°C. Lors de leur commercialisation, la concentration en acide doit être d'au moins 0,7% **(Fredot, 2005).**

Selon la norme n° A-11 (1975) du Codex Alimentarius, le yaourt est défini comme suit : « Le yaourt est un produit laitier coagulé obtenu par fermentation lactique grâce à l'action de *Lactobacillus bulgaricus* et de *Streptococcus thermophilus*, issu du lait frais ou du lait pasteurisé. (ou concentré, partiellement écrémé, enrichi en matière sèche) avec ou sans ajout (lait en poudre, lait écrémé en poudre, etc.). Les microorganismes présents dans le produit final doivent être à la fois viables et en grande quantité. »

Dans de nombreux pays, la loi requiert que les bactéries présentes dans le yaourt demeurent vivantes dans le produit commercialisé. Certains pays reconnaissent qu'après une étape de chauffage visant à prolonger la durée de conservation, cela détruit les bactéries vivantes. Cette pratique bien que

tolérée dans certains pays, elle n'est pas recommandée, car elle altère les caractéristiques sensorielles et fonctionnelles du yaourt **(FAO, 1995).**

1.3. Les Bactéries spécifiques du yaourt :

Dans la fabrication du yaourt, les deux bactéries (*Streptococcus thermophilus* et *Lactobacillus bulgaricus*) agissent conjointement pour abaisser le pH du lait jusqu'au point isoélectrique de la caséine (pH 4,6), provoquant ainsi la formation d'un gel (Coagulum). En plus de leurs rôle acidifiant, ces bactéries participent à la production de composés aromatiques, principalement l'acétaldéhyde, mais aussi la cétone, l'acétoïne et le diacétyle,responsables de la saveur typique du yaourt. Certaines souches produisent également des polysaccharides extracellulaires (glucanes), qui influencent directement la texture et la viscosité du produit final **(FAO, 1995).**

1.3.1. L'espèce Lactobacillus bulgaricus :

Lactobacillus delbrueckii ssp bulgaricus est un bacille gram positif, non mobile, asporulé et microaérophile. Il se présente sous forme de bâtonnets isolés ou en chaînes (Figure 04), il Possédant un métabolisme homofermentaire, il génère de l'acide D-lactique à partir des hexoses via la voie d'Embden Meyerhoff Parnas (EMP) et n'a pas la capacité de fermenter les pentoses **(Axelsson, 1998).** Sa croissance optimal s'observe entre 45 à 50°C en acidifiant fortement le lait jusqu'à 1,8 % à 2,7 % d'acide lactique correspondant à un pH compris entre 4.5 et 3.6 **(FAO, 1995)**.

Figure 4 : Aspect des cellules de Lb. Bulgaricus sous le microscope électronique.

1.3.2. L'espèce *Streptococcus thermophilus :*

C'est un Cocci, Gram positif, anaérobie facultatif, non mobile, disposé en chaînes de longueurs variables ou en pair **(Figure 05)**, présent dans les laits fermentés et les fromages **(Roussel et *al.*, 1994).** C'est une bactérie dépourvue de l'antigène D, qui est sensible au bleu de méthylène (0,1%) et à plusieurs antibiotiques. Elle ne peut pas métaboliser le galactose et se développe bien entre 37 et 40 °C, tout en restant capable de croître à 50 °C. Elle est capable de résister à des températures de 65 °C

pendant une demi-heure ou à 74 °C pendant quinze secondes, et possède un métabolisme homofermentaire produisant principalement de l'acide lactique **(Vaillancourt et *al*., 2008).**

Figure 5 : Aspect des cellules de St. thermophilus sous le microscope électronique.

1.4. La proto-coopération entre *St. thermophilus* et *Lb. Bulgaricus :*

La production de yaourt repose sur une interaction synergique entre deux espèces de bactéries lactiques, *St. thermophilus* et *Lb. Bulgaricus.* On parle fréquemment de proto-coopération en décrivant la relation entre ces deux espèces, car elle est avantageuse sans être obligatoire à la croissance de chacune des espèces dans le lait **(Thevenard, 2011).** Cette collaboration recherchée aboutit à une stimulation réciproque se traduisant par plusieurs effets positifs **(Mihail et *al*., 2009) :**

- Une acidification plus rapide du milieu ;
- Une augmentation de la population bactérienne finale ;
- Un abaissement plus prononcé du pH final ;
- Une production accrue de composés aromatiques, en particulier d'acétaldéhyde ;
- Une stabilité améliorée du produit final ;
- Une production plus conséquente de certains éléments tels que les polysaccharides extracellulaires (EPS).

Pour se développer, les bactéries ont besoin d'acides aminés et de peptides directement assimilables. Or, le lait n'en contient que de faibles quantités permettant seulement de démarrer leur croissance **(Thevenard, 2011).** *St. thermophilus* se développe plus rapidement a un pH compris entre 6,6 et 6,8 du lait en rendant le lait anoxique et légèrement acide,

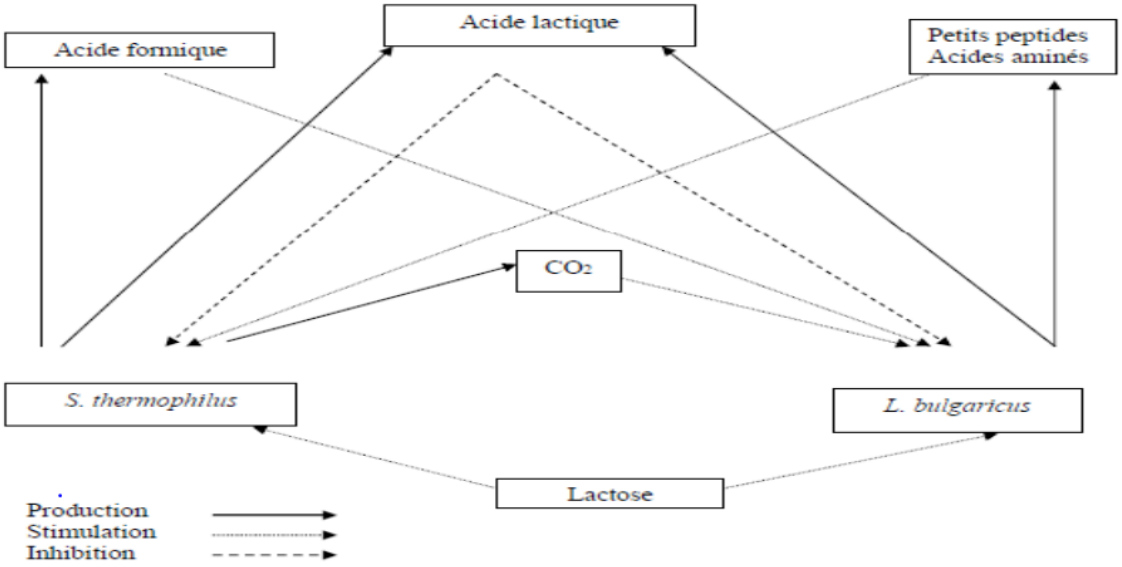


Figure 6 : Proto-coopération entre St. thermophilus et Lb. Bulgaricus (Mahaut et al., 2000).

permettant à *Lb. Bulgaricus* de prendre le relai en abaissant le pH jusqu'à environ 4,3 à 4,2 grâce à l'hydrolyse de la caséine, qui libère des peptides permettant au streptocoque de poursuivre sa croissance.

De son côté, *S. thermophilus* stimule la croissance du lactobacille en produisant l'acide formique, le dioxyde de carbone et l'acide pyruvique qui agissent comme facteur de croissance **(Figure 06) (Jeantet et *al.*, 2008).**

La production d'acide lactique diffère également selon l'espèce, *S. thermophilus* produit majoritairement la forme L(+), tandis que *L. bulgaricus* génère principalement la forme D(-).

A la fin de la fermentation, environ le tiers du lactose initial est transformé en acide lactique. Dans la fabrication du yaourt, l'utilisation du lactose se fait selon la voie suivante : une lactase hydrolyse le lactose en galactose et en glucose. Ce dernier est ensuite transformé en acide pyruvique puis en acide lactique pendant que le galactose s'accumule progressivement dans le lait sans être utilisé. Ainsi, dans un lait à 6,5 % (en poids) de lactose, 100 g du yaourt obtenu contiennent environ près deux jours de conservation 4 g de lactose, 0,05 g de glucose, 0,05 g d'oligosaccharide et 1,5 g de galactose **(FAO, 1995).**

1.5. Aptitudes technologiques des bactéries lactiques du yaourt :

Les bactéries lactiques, ont un rôle crucial dans la fermentation des matières premières d'origine animale et végétale. Leur aptitude à fermenter les glucides, et dans une moindre mesure à hydrolyser les protéines et les lipides conduit à la production d'une vaste variété de métabolites, comme les acides organiques, les peptides, les substances antimicrobiennes et aromatiques ainsi que les exopolysaccharides (EPS). Ces métabolites peuvent influencer les propriétés organoleptiques, technologiques et nutritionnelles des aliments fermentés **(Mozzi et *al*., 2010)**.

1.5.1. Aptitude acidifiante :

La production d'acide lactique est l'une des principales fonctions des bactéries lactiques en technologie laitière, car cet acide organique permet de concentrer et de conserver la matière sèche du lait, en intervenant comme coagulant et antimicrobien **(Kuipers et *al.*, 2000).** Le processus d'acidification du yaourt dépend de l'activité symbiotique de *St. thermophilus et Lb. delbrueckii ssp. Bulgaricus.* L'importance de l'acide lactique durant la fabrication du yaourt peut se résumer comme suit **(Leory et *al., 2002* ; Sinngh Sudheer et *al*., 2006)** :

- Il aide à déstabiliser les micelles de caséine, ce qui conduit à la formation du gel ;
- Il donne au yaourt son goût distinct, comme il contribue à la saveur et l'aromatisation du yaourt ;
- Il intervient comme inhibiteur vis-à-vis des micro-organismes indésirables.

L'acidité du yaourt est communément exprimée en degré Dornic (1°D = 0.1g d'acide lactique /L de lait). Elle se situe entre 100 et 130°D **(Loones, 1994)**

1.5.2. Aptitude protéolytique :

La croissance des bactéries lactiques jusqu'à des densités cellulaires suffisante pour permettre à ces dernières d'assurer les fonctions de fermentation repose sur un système protéolytique capable de satisfaire tous les besoins en acides aminés nécessaires à partir de l'hydrolyse des protéines du lait. Les bactéries lactiques présentes des capacités protéolytique différentes, liées à leur équipement enzymatique et de leur aptitude à exploiter la fraction azotée **(Monnet et *al.*, 2008 ; Roudj et *al.*, 2009).**

Il est connu que l'activité protéolytique de *Lb.delbrueckii, ssp. bulgaricus* est plus élevée que celle de *St. thermophilus* **(Gürsoy et *al*., 2010).**

1.5.3. Aptitude texturante :

La texture et l'onctuosité constituent pour le consommateur les éléments les plus importants d'appréciation de la qualité du yaourt. Certaines souches bactériennes produisent, à partir du

glucose, des polysaccharides qui sont constitués de longues chaînes d'unités répétitives de sucres simples et /ou de dérivés de glucides plus ou moins ramifiées **(Ruas-Madiedo et *al.*, 2001).**

Il est couramment admis que la production des exopolysaccharides (EPS) est le résultat de l'action exercé par *St. thermophilus.* Cependant, *Lb. bulgaricus* possède également la capacité à produire des EPS composés de galactose, glucose, rhamnose, à des rapports approximatifs de 1:4. L'utilisation de ces bactéries productrices d'EPS améliorela résistance du coagulum du yaourt aux chocs physiques et thermiques, et joue un rôle important dans l'obtention d'une fermeté satisfaisante ainsi que d'une viscosité optimale **(Ngoufack et *al.*, 2004 ; Vaningelgem et *al.*, 2004)**.

1.5.4. Aptitude aromatisante :

Divers composés volatiles et aromatiques interviennent dans la saveur et l'appétence du yaourt. C'est principalement le lactose qui joue un rôle dans la formation de ces composés. Parmi eux, outre l'acide lactique qui confère au yaourt son goût acidulé, c'est l'acétaldéhyde qui a été identifié comme le plus important des composés carbonyliques contribuant à l'arôme typique du yaourt **(Enel et *al.*, 2011).** Il provient en grande partie de la transformation de la thréonine. Les deux bactéries du yaourt *Lb. bulgaricus* et *St. thermophilus* sont capables d'en produire, mais à des proportions différentes, sa concentration optimale est estimée entre 17 et 41 mg/l au cours de la fermentation du yaourt **(Chaves et *al., 2002*; Bongers et *al.*, 2004).**

1.5.5. Aptitude lipolytique :

Les ferments lactiques possèdent des lipases et des estérases qui peuvent hydrolyser les triglycérides en acides gras. Ils peuvent produire certains acides gras volatils, (C2 - C6), qui contribuent à la saveur caractéristiques des produits laitiers fermentés. Cependant, la lipolyse reste généralement faible dans le yaourt, et son effet en terme de flaveur finale est le plus souvent considéré comme non significatif **(Béal et *al.*, 2008).**

1.5.6. Aptitude antagonistique :

Les composés antimicrobiens produits par les bactéries lactiques peuvent inhiber la croissance des bactéries pathogènes dans les produits fermentés. Ces composés inclues le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), le dioxyde de carbonne (CO_2), le diacétyle, l'acétaldéhyde, les D-isomères des acides aminés et les bactériocines **(Cintas et *al.*, 2001 ; Akpinar et *al.*, 2011).**

La production d'acide lactique diminue le pH en créant un milieu défavorable au développement des microorganismes pathogènes **(Aslim et *al.*, 2004).** l'acide lactique existe sous

deux formes, dissociées et non dissociées, dont l'ampleur de la dissociation dépend du pH. À pH acide, la grande quantité d'acide lactique est sous la forme non dissociée qui est toxique pour beaucoup de bactéries, levures et moisissures.

2. Technologie de fabrication :

Les étapes de fabrication (résumées dans la figure 06) peuvent différer selon le type de produit fini souhaité.

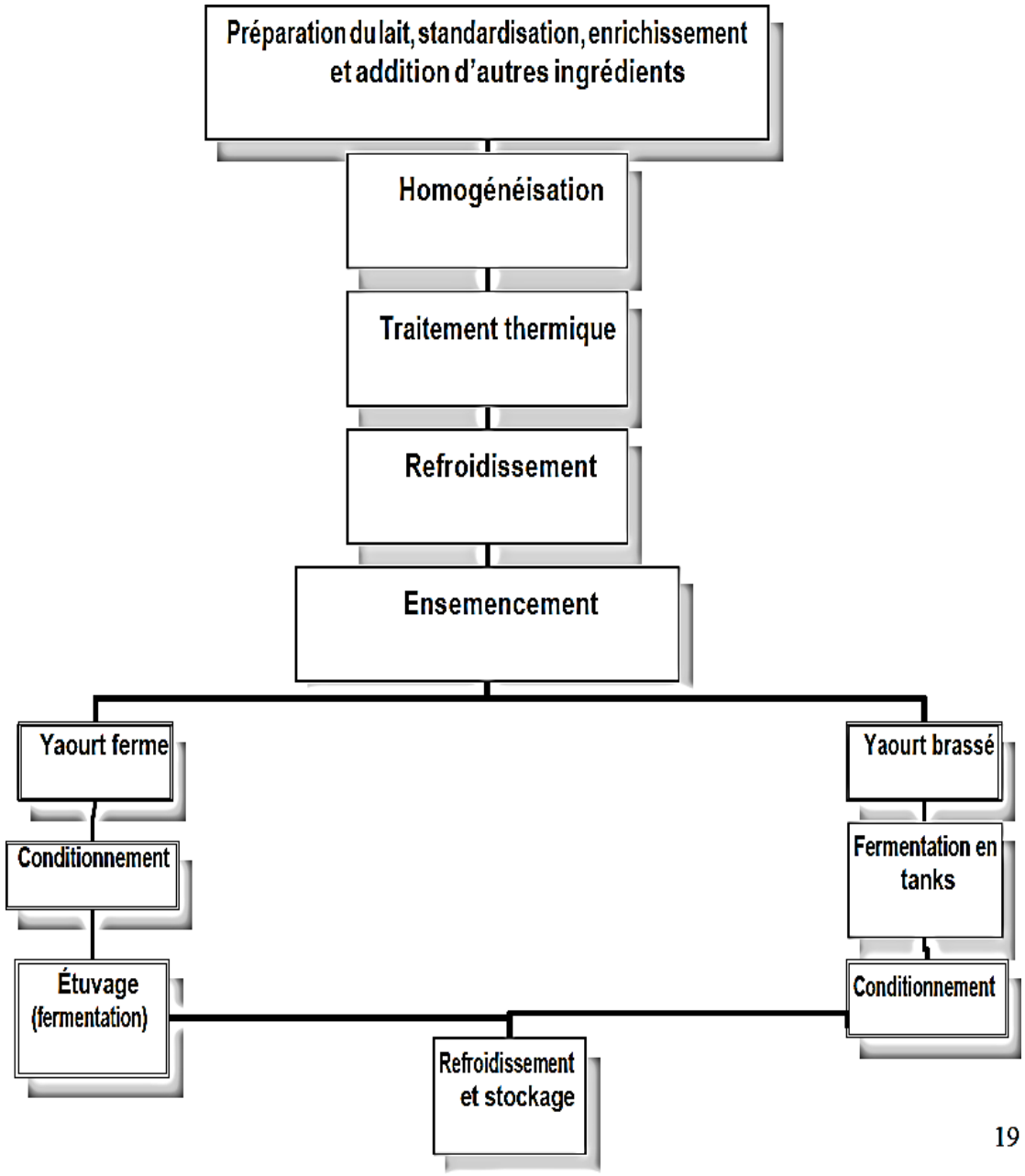


Figure 7 :Diagramme général du procédé de fabrication du yaourt

(Gouaich et Mekemeche, 2022)

Nous distinguons dans le processus d'élaboration les étapes énumérées ci-dessous :

2.1. Standardisation du mélange :

Les procédés de fabrication peuvent varier selon le type de yaourt : le yaourt « étuvé » dont la fermentation s'effectue directement en pot; et le yaourt « brassé », dont la fermentation a lieu dans une cuve avant le brassage du caillot afin d'obtenir une texture plus fluide, suivi du conditionnement. Dans l'ensemble, le processus de fabrication comprend plusieurs étapes successives **(Schmid et *al*., 1994).**

Le yaourt peut avoir une teneur variable en matières grasses. En général, elle est modifiée pour que le produit soit classé dans l'une des catégories suivantes :
- Yaourt entier : doit contenir au moins 3% (m/m) de matières grasses.
- Yaourt partiellement écrémé : contenant moins de 3% (m/m) de matière grasse.
La consistance et la viscosité du yaourt dépendent en grande partie de la teneur en matières sèches du lait. La présence de matière grasse apporte une texture crémeuse, atténue l'acidité et rehausse le goût. Les protéines renforcent la texture et atténuent également l'acidité. D'après le Code des recommandations **FAO/OMS (1975)**, la teneur minimale en matière sèche non grasse des produits laitiers doit être de 8,2% (m/m), indépendamment de la quantité de matières grasses présente.

2.2. Traitement thermique :

Une fois le lait préparé, il est soumis à une pasteurisation thermique à 94 à 96°C pendant une durée de 3 à 5 minutes. L'objectif de ce traitement est de :
- Éliminer les micro-organismes nuisibles qui pourraient être présents ainsi que l'essentiel de la flore ordinaire. Il offre également la possibilité d'éliminer des inhibiteurs naturels et de stimuler les bactéries grâce à la libération de facteurs de croissance.
-Dénaturer partiellement les protéines sériques (β-lactoglobuline, α-lactalbumine), favorisant leur fixation sur les micelles de caséines. Cet effet a pour conséquence d'augmenter les capacités de rétention d'eau du yaourt entraînant la modification des propriétés rhéologiques du coagulum acidifié. Le caillé devient plus ferme et la tendance à l'expulsion du sérum au cours du stockage est réduite. Grâce à ce traitement, le yaourt brassé présente une texture plus homogène et visqueuse (**Carole et Vignola, 2002**).

2.3. Ensemencement :

Il se fait à l'aide d'un levain constitué exclusivement des deux bactéries spécifiques du yaourt : *Streptococcus thermophilus* et *Lactobacillus bulgaricus.* Une agitation homogène est nécessaire afin d'assurer une répartition parfaites des micro-organismes dans le mélange lait/ferment.

2.4. Fabrication de levain lactique :

Le levain peut être préparé sur place et réutilisé plusieurs fois, ce qui représente une option économiquement avantageuse. Cette méthode est exclusivement recommandée pour les producteurs agricoles qui produisent quotidiennement de grandes quantités de yaourts (3000 pots par cycle). Pour être mise en pratique avec succès, elle exige des compétences adéquates et du matériel approprié. En effet, elle requiert de fortes exigences dans le travail en terme de rigueur et d'asepsie pour obtenir des ferments purs et éviter toute contamination microbienne indésirables. Le levain est élaboré en combinant des ferments « semi-directs » commerciaux (sous forme de poudre lyophilisée) réhydratés avec du lait demi-écrémé stérilisé **(Ghalem 2014).**

2.5. Conservation de levain :

Les ferments lactiques sont souvent conservés à court terme à une température inférieure à 10 °C en milieu liquide (dans du lait reconstitué) après inoculation à 30°C pendant 16 à 18 heures ou à 42°C pendant 3 à 4 heures. Pour une conservation à long terme, ces bactéries peuvent être conservées par congélation dans l'azote liquide à -196°C ou à -40 °C en présence bien évidemment d'un cryoprotecteur tel que le glycérol **(Ghalem, 2014).**

2.6. Rôle et propriétés des levains lactiques :

La première fonction des levains lactiques est d'assurer la production d'acide lactique à partir de lactose, et contribuant ainsi à l'abaissement du pH et la coagulation du lait.

Cependant, leurs rôles technologiques sont diverses et varient en fonction du type de produit laitier fermenté :

- Production d'acide lactique et abaissement du pH du milieu ;
- Production de composés aromatiques (diacétyl, acétaldéhyde …ect) ;
- Synthèse d'enzymes protéolytiques participant à l'affinage des fromages ;
- Production d'ecopolysaccharides (EPS) améliorant améliorant la texture et la viscosité des produits fermentés ;

- Rôle inhibiteur sur les micro-organismes indésirable, dû à l'acidification du milieu et la production de métabolites antimicrobiens **(Ghalem, 2014).**

2.7. Réchauffage :

Le lait ainsi reconstitué et ensemencé est généralement porté à une température d'environ 45°C en passant par des échangeurs de chaleur à plaques. Le Streptocoque se développe de manière optimale à une température de 42-45°C, tandis que le Lactobacille préfère une température légèrement supérieure, de 47-50°C.
En fonction des zones géographiques, les consommateurs ont une préférence pour des yaourts plus ou moins acides et aromatiques. Les caractéristiques sensorielles (acidité, arôme, texture) varient en fonction des souches employées et de la température d'incubation. Ainsi une réduction de la température de 1 à 3°C (42-44°C), stimule la croissance du streptocoque et par conséquent, la production d'arômes (acétaldéhyde, diacétyle), tandis qu'une élévation légère (45-46°C), favorise davantage la croissance du lactobacille et par conséquent, la production d'acide et l'acidification du milieu **(Schmidt et *al*., 1994).**

2.8. Etuvage / brasage :

Selon la nature du yaourt à fabriquer, on procède soit à une incubation au niveau des chambres chaudes dans le cas du yaourt ferme (étuvés) ou à une fermentation en cuve pour les yaourts brassés :

2.8.1. Phase d'incubation (étuvage) :

Pour les yaourts étuvés, le lait ensemencé est rapidement distribué dans des récipients ou des pots en plastique (de type polyéthylène ou polypropylène). L'ajout d'additifs ou d'arômes s'effectue avant la mise en pots.

Suite au processus de capsulage, les pots sont dirigés vers une chambre chaude (étuve) pour incubation qui dure approximativement entre 2 et 3 heures. La température et la durée d'incubation influencent l'acidification. Les pots sont maintenus dans l'étuve jusqu'à l'obtention d'une acidité de 0.75 à 1% environ d'acide lactique soit 75 à 100°D. Le caillé formé doit présenter une texture ferme, lisse et sans synérèse (absence d'exsudation de sérum).

Dès que le niveau d'acidité désiré est atteint, les pots de yaourt sont retirés des lieux d'incubation et refroidis rapidement à une température de 4 °C. Cela vise à arrêter la fermentation par inhibition de l'activité bactérienne. Les pots sont ensuite conservés à cette

température pendant une période de 12 à 24 heures afin de consolider la texture du produit grâce au froid. **(Tamime, 1999).**

2.8.2. Brassage :

Pour les yaourts brassés, le lait ensemencé est incubé en cuve fermée est conservé à 42-46 °C jusqu'à l'obtention du degré d'acidité souhaité. Le coagulum formé est ensuite découpé et brassé afin d'obtenir une texture crémeuse et homogène. Cela doit être réalisé avec soin selon l'une des méthodes suivantes :

- Agitation mécanique à l'aide d'un brasseur à turbine ou à hélice ;
- Passage du gel à travers un tamis ;
- Homogénéisation à basse pression.

Une fois ce traitement opéré, le caillé est immédiatement et rapidement refroidi à une température inférieure à 10°C. Le yaourt est ensuite conditionné en pots et conservé entre 2 et 4°C. L'addition éventuelle d'arômes, de pulpes de fruits, etc., se fait au moment du remplissage des pots (**Courtin *et al.*, 2002 ; Ngounou *et al.*, 2003).**

3. Intérêt santé de yaourt :

L'acide lactique contenu dans le yaourt possède une propriété antiseptique légère.Cette acidité freine la prolifération des micro-organismes pathogènes dans le tube digestif. En outre, cette acidité stimule les mouvements péristaltiques, ce qui facilite l'élimination des bactéries indésirables et contribue à un meilleur confort intestinal. Certaines souches de *Streptococcus thermophilus* empêchent également l'installation de certaines bactéries nuisibles dans l'intestin, telles que les Salmonelles et les colibacilles. Cependant, Les bactéries présentes dans le yaourt ne s'implantent pas durablement dans la flore intestinale. C'est pour cette raison qu'une consommation régulière est indispensable pour préserver leurs effets bénéfiques. De manière général, le yaourt est un aliment vivant qui améliore l'équilibre du microbiote intestinal et atténue les troubles digestifs **(Ferdot, 2005).**

4. Les probiotiques :

4.1. Définition :

L'expression probiotique a été introduite en 1965, en contraste avec les antibiotiques. Lilly et Stillwell les ont décrits comme des éléments issus des micro-organismes qui entraînent la prolifération d'autres micro-organismes **(Dolié, 2018).** Le terme probiotique vient des deux mots grecs « pros » et « bios » qui se traduisent par « pour la vie » ou « en faveur de la vie », à l'opposé du terme antibiotique qui signifie « contre la vie ». Les probiotiques, qui sont des micro-organismes vivants comme des levures ou des bactéries, sont souvent incorporés dans certains produits alimentaires fermentés comme le yaourt et sont commercialisés sous forme de compléments alimentaires au vu de leurs effets bénéfiques sur la santé humaine .Selon la définition adoptée par l'OMS et la FAO en 2002 un probiotique est un micro-organisme vivant qui, lorsqu'il est consommé en quantité suffisante il exerce un effet bénéfique sur la santé de l'hôte **(FAO, 2002).**

4.2. Classification des probiotiques :

Les probiotiques se composent de bactéries ou de levures qui se trouvent naturellement dans le corps humain, principalement dans la flore intestinale humaine. On peut distinguer trois grands groupes de micro-organismes à activité probiotique **(Lignon et Chiny, 2013).**

4.2.1. Les bactéries lactiques :

Il s'agit des probiotiques les plus répandus. Elles sont capables d'assimiler le lactose et le transformer en acide lactique, qui est leur produit métabolique principal, entraînant une baisse du pH du milieu ce qui inhibe la croissance de bactéries pathogènes. Cette catégorie comprend généralement des genres tels que *Lactobacillus, Bifidobacterium, Streptococcus, Enterococcus, Lactococcus, Leuconostoc et Pediococcus.*

4.2.2. Les bactéries non lactiques :

Certaines espèces, notamment du genre *Bacillus*, étaient auparavant utilisées dans la prévention et le traitement des diarrhées. Cependant, en raison du manque d'études cliniques confirmant leur efficacité, ces bactéries ont été progressivement abandonnées **(Bernier, 2010)**.

4.2.3. Levures du genre Saccharomyces :

Les levures *Saccharomyces cerevisiae* et *Saccharomyces boulardii*, présentes dans des produits fermentés tels que la bière, les produits laitiers et certains yaourts, sont aussi considérées comme probiotiques. *Saccharomyces boulardii* est une levure tropicale, découverte en Indochine en 1923 par le chercheur français Henri Boulard. Il a extrait la levure de différents fruits tropicaux (comme le litchi et la papaye) après avoir remarqué que les habitants locaux utilisaient la peau de ces fruits dans

le traitement de la diarrhée. Le cytoplasme de *S boulardii* riche en glycogène, vitamines et enzymes hydrolytiques telles que les lipases, les protéases et les disaccharidases **(Periti, 2001).** Les micro-organismes utilisées comme probiotiques sont regroupées dans le **(Tableau 3).**

Tableau 3 :Principales espèces microbiennes utilisées comme probiotiques (Bernier, 2010).

Genres	**Espèces**
Lactobacillus	*L. rhamnosus, L. acidophilus, L. casei, L. bulgaricus, L. gasseri, L. reuterii, L. plantarum, L. sporogenes*
Bifidobacterium	*B. longum, B. breve, B. infantis, B. bifidum, B. adolescentis*
Lactococcus	*L. cremoris, L. lactis*
Enterococcus	*E. faecium*
Streptococcus	*S. thermophilus*
Pediococcus	*P. acidilactici*
Bacillus	*B. subtilis, B. licheniformis, B. megaterium, B. clausii, B. laterosporus,B. pumilus*
Saccharomyce	*S. cerevisiae, S. cerevisiae var boulardi*

5. Probiotiques et santé :

Des études ont confirmé les nombreux effets bénéfiques des probiotiques sur la santé humaine. Ils contribuent à la prévention et au traitement de différentes types de diarrhée, y compris la diarrhée du voyageur et la diarrhée associée à la prise d'antibiotiques **(Beausoleil et *al*., 2007; McFarland, 2007)**. Ils permettent également à réduire et à traiter certaines infections gastro-intestinales **(Salminen et *al*., 2005)**. Les probiotiques ont un favorise une meilleure digestion et aident à réduire les symptômes de l'intolérance au lactose **(Nagpalet *al*., 2007)**. Ils possèdent également des propriétés antimicrobiennes par la production de bactériocines **(Klaenhammer, 1988)**. Certaines souches ont démontré leur capacité à prévenir des maladies chroniques telles que la maladie de Crohn, l'obésité et le diabète **(Schultz et *al*., 2004; Yadav et *al*., 2007)**. D'autres recherches suggèrent également qu'ils pourraient jouer un rôle crucial dans la prévention du cancer du côlon **(Wollowski et *al*., 2001)**. Ils contribuent également à la modulation du système immunitaire et au renforcement de la muqueuse intestinale **(Matsuzaki et Chin, 2000; Madsen, Cornish et *al*., 2001)**.

Tableau 4 :Les principaux effets bénéfiques attribués aux probiotiques (Salminen et al., 2004; Patterson, 2008).

Effet intestinaux	**Effet sur le système immunitaire**	**Autres effets**
Contrôle des troubles suivants :	**Effet immunitaire :**	**Réduction du risque de :**
Mauvaise digestion du lactose	Modulation immunitaire	Certains cancers (colorectal, vessie, col utérin, sein)
Diarrhée due aux rotavirus et Diarrhée-associée aux antibiotiques	Répression des réactions allergiques par réduction de l'inflammation	Coronaropathie
Syndrome du côlon irritable	Réduction des risques d'infection par des agents pathogènes courants (*Salmonella, Shigella)*	Maladie des voies urinaires
Constipation		Infection des vois respiratoires supérieures et infections connexes
Infection par *Helicobacter pylore*		Réduction du cholestérol sérique et de la pression artérielle
Prolifération bactérienne dans l'intestin grêle.		
Maladies inflammatoires chroniques de l'intestin.		
Prévention de l'entérocolite Nécrosante du nouveau-né.		

Partie 2
Partie expérimentale

Partie 02 : Partie expérimentale

1. Objectifs

Ce travail a pour objectif de mettre en valeur les mucilages et les pectines extraits des graines de fenouil *(Foeniculum vulgare)* à travers l'étude de leur activité prébiotique et leur utilisation comme ingrédients fonctionnels dans la formulation de yaourts.

L'étude consiste à :

Extraire les mucilages et les pectines à partir des graines de fenouil selon une méthode appropriée.

Évaluer leur activité prébiotique en étudiant leur effet sur la croissance de souches probiotiques sélectionnées.

Incorporer ces extraits polysaccharidiques dans la fabrication de yaourts fonctionnels et suivre leur évolution au cours du stockage réfrigéré à 4 °C, à travers des analyses physico-chimiques et microbiologiques.

2. Matériel et méthodes

2.1 Origine de la matière première

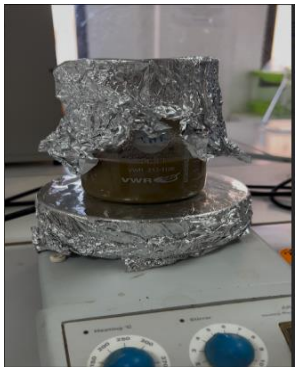
La matière première de cette étude de recherche (grains de *Foeniculum vulgare*) a été collectée dans la région de Mostaganem, située à environ 35,933333 Latitude et de 0,083333 Longitude.

Les graines de *Foeniculum vulgare* ont été achetées sous forme de poudre auprès d'un herboriste spécialisé dans la vente de plante aromatiques et médicinales. La poudre a ensuite été transférée dans des bocaux hermétiques fumés et conservés à l'abri de la lumière et de l'humidité, à température ambiante afin de préserver ses propriétés physico-chimiques et microbiologiques.

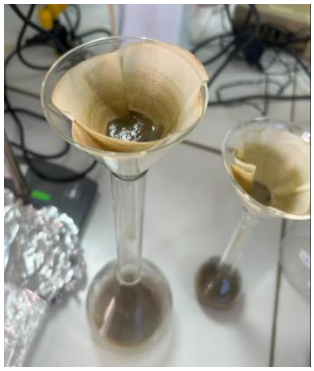
3. L'extraction des mucilages et pectines

3.1 L'extraction des mucilages

L'extraction des mucilages à partir des graines de fenouil (*Foeniculum vulgare*) a été réalisée selon une méthode adaptée par **Otálora et *al*., (2021)**, avec quelques modifications. Une quantité de 50 g de poudre de graines a été mélangée avec 500 mL d'eau distillée (rapport 1:10, m/v). La suspension obtenue a été chauffée à 40 °C sous agitation modérée pendant deux heures, puis filtrée soigneusement afin de récupérer la fraction soluble. L'extraction a été répétée une seconde fois dans les mêmes conditions afin d'assurer une récupération maximale des mucilages. Le filtrat obtenu a ensuite été soumis à une précipitation par ajout progressif d'éthanol à 96 % dans un rapport volumique de 3 :1 (éthanol : filtrat). Le mélange a été maintenu au repos pendant 24 heures à 4 °C pour permettre la formation du précipité. Le précipité de mucilages ainsi formé a été récupéré par centrifugation, puis lavé à l'aide d'un mélange éthanol/eau (70 :30, v/v) afin d'éliminer les impuretés solubles. Enfin, le produit a été séché dans un bain-marie à 50 °C jusqu'à obtention d'une masse constante.



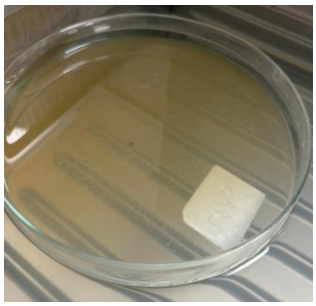
1-Extraction



2- Filtration

3- Précipitation

4- Centrifugation



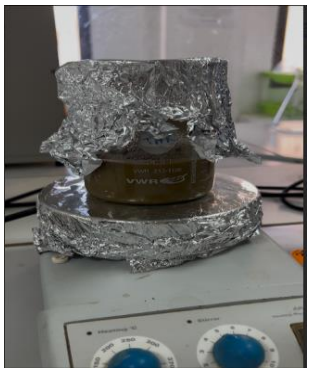
5- Séchage

6- Les mucilages

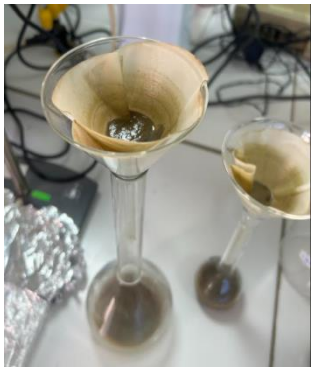
Figure 8 :Etapes d'extraction de mucilage des graines de fenouil

3.2.L'extraction des pectines

L'extraction des pectines à partir des graines de fenouil (*Foeniculum vulgare*) a été réalisée selon la méthode adoptée par **Belkheiri et *al*., (2021)**. A partir de 50 g de poudre de graines. La poudre a été hydratée dans 500 mL d'eau distillée et le mélange a été laissé au repos pendant 30 minutes afin de favoriser le gonflement des fibres. Le pH de la suspension a ensuite été ajusté entre 1,5 et 2 à l'aide d'HCl dilué, puis le mélange a été chauffé dans une plaque chauffante à 85 °C pendant 1 h 30 min sous agitation magnétique régulière en veillant à éviter toute ébullition violente. Après chauffage, la suspension a été filtrée à chaud à l'aide d'un papier filtre afin de récupérer le filtrat contenant les pectines dissoutes. La précipitation des pectines a été effectuée en ajoutant au filtrat de l'éthanol à 96 % dans un rapport de 3 volumes d'éthanol pour 1 volume de filtrat (3:1, v/v) sous agitation continue. Le mélange a été laissé au repos pendant 24 heures à 4 °C pour permettre la formation du précipité. Le précipité de pectine obtenu a été récupéré par centrifugation, puis lavé avec un mélange éthanol/eau (70/30, v/v) pour éliminer les impuretés solubles. Enfin, le produit a été séché dans un bain marie à 50 °C jusqu'à obtention d'une masse constante.



1- Extraction



2- Filtration

3- Précipitation

4Centrifugation

5- Séchage

6- Pectine

Figure 9 : Etapes d'extraction de pectine des graines de fenouil.

4. Analyses effectuées

Remarque : Les différentes analyses et dosages présentés dans cette section ont été réalisés selon les mêmes protocoles expérimentaux pour les deux types d'extraits, à savoir les mucilages et les pectines, afin d'assurer la comparabilité des résultats obtenus.

4.1. Dosage des sucres totaux

Le dosage des sucres totaux (oses neutres) de l'extrait brut de *Foeniculum vulgare* est réalisé selon la méthode de **(Dubois et *al.*, 1951)**. Cette méthode repose sur la réaction des sucres avec le phénol et l'acide sulfurique, conduisant à la formation d'un composé coloré dont l'intensité est proportionnelle à la concentration totale en sucres présents dans l'extrait, et dont l'absorbance est mesurée par spectrophotométrie.

Des solutions de calibration à base d'acide galacturonique et de glucose, ainsi que différentes dilutions des extraits (1/2, 1/5, 1/10 et 1/20), ont été préparées. Dans des tubes à essai, 200 µL de chaque solution (blanc, gamme de calibration, extrait brut ou dilué) ont été introduits, puis 200 µL de phénol à 5 % ont été ajoutés. Après homogénéisation par vortexage , 1 ml d'acide sulfurique concentré a été ajouté avec précaution, en raison du dégagement de chaleur, puis les tubes ont été de nouveau mélangés. Les tubes ont ensuite été placés dans un bain-marie à 100 °C pendant 5 minutes, refroidis immédiatement dans un bain d'eau froide, puis maintenus à l'obscurité pendant 30 minutes. L'absorbance des solutions a été mesurée à 492 nm à l'aide d'un spectrophotomètre. La teneur en sucres totaux a été déterminée à partir d'une courbe d'étalonnage établie dans les mêmes conditions expérimentales, en utilisant le glucose ou l'acide galacturonique comme standard.

Les résultats sont exprimés en mg équivalent glucose (ou acide galacturonique) par millilitre d'extrait (mg Éq. / mL) et en mg équivalent glucose (ou acide galacturonique) par gramme de matière sèche (mg Éq. /g MS).

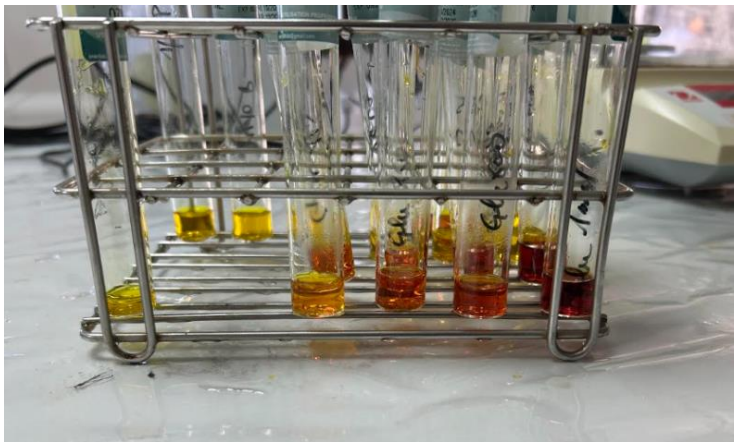


Figure 10 :Développement de la coloration lors du dosage des sucres totaux

(méthode de Dubois, 1951)

4.2. Dosage des sucres réducteurs

Le dosage des sucres réducteurs de l'extrait brut de *Foeniculum vulgare* est réalisé selon la méthode de **Miller, (1959)**. Cette méthode repose sur la capacité des sucres réducteurs à réduire le réactif à l'acide 3,5-dinitrosalicylique (DNS) en milieu alcalin, conduisant à la formation d'un composé coloré rouge orangé dont l'intensité est proportionnelle à la concentration en sucres réducteurs présents dans l'extrait. L'absorbance est mesurée à 540 nm à l'aide d'un spectrophotomètre.

Le réactif DNS (acide 3,5-dinitrosalicylique) a été préparé en chauffant doucement 40 ml d'eau distillée à environ 50 °C sous agitation magnétique, puis en y dissolvant 1 g de DNS. Après dissolution complète, 2 g de NaOH ont été ajoutés lentement, en raison du caractère exothermique de la réaction, ce qui entraîne un changement de couleur du mélange vers le brun-rouge. Ensuite, 30 g de sel de Rochelle (tartrate double de sodium et de potassium) ont été incorporés par petites portions tout en maintenant la température entre 50 et 60 °C afin de faciliter la dissolution. Pour améliorer la stabilité du réactif, 0,2 g de phénol et 0,1 g de sulfite de sodium ont été ajoutés. Le mélange a ensuite été transféré dans une fiole jaugée de 100 ml, le bécher rincé, puis le volume complété à 100 ml avec de l'eau distillée. La solution obtenue a été homogénéisée et conservée dans un flacon ambré à 4 °C, bien bouché. Le réactif reste stable plusieurs semaines, voire plusieurs mois en présence de sulfite.

Pour le dosage, 0,5 ml de l'échantillon ont été mélangés à 0,5 ml du réactif DNS dans un tube à essai. Les tubes ont ensuite été placés dans un bain-marie bouillant pendant 5 minutes, puis rapidement refroidis dans un bain d'eau glacée. L'absorbance des solutions a été mesurée à 540 nm

contre un blanc constitué d'eau distillée et de réactif DNS. La quantification a été effectuée à l'aide d'une courbe d'étalonnage établie dans les mêmes conditions expérimentales, en utilisant le glucose comme standard, dans une gamme de concentrations comprise entre 0 et 250 µg/ml.

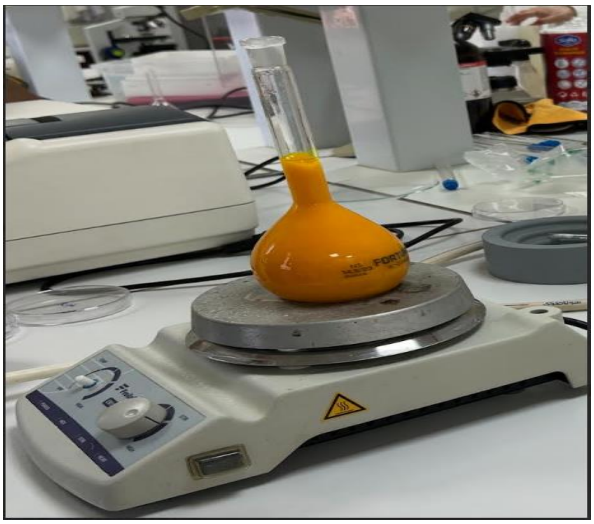


Figure 11 : Préparation du réactif DNS (dinitrosalicylique)

4.3. Dosage des acides uroniques

Le dosage des acides uroniques a été réalisé selon la méthode colorimétrique décrite par **Blumenkrantz et Asboe-Hansen, (1973)**. Cette méthode repose sur la réaction des acides uroniques avec le **méta-hydroxydiphényle (MHDP)** en milieu acide et chauffé, entraînant la formation d'une **coloration rose** dont l'intensité est proportionnelle à la concentration en acides uroniques présents dans l'échantillon.

Trois tubes en verre ont été préparés pour chaque valeur de la gamme étalon et chaque échantillon, en incluant un témoin (blanc). Dans chaque tube, **200 µL** de solution étalon (acide galacturonique ou glucose) ou d'échantillon ont été introduits, puis placés dans un **bain d'eau glacée**. Ensuite, **1,25 ml** de la solution de tétraborate (borax-H_2SO_4) ont été ajoutés délicatement le long des parois à l'aide d'une micropipette, puis les tubes ont été vortexés pour assurer un bon mélange.

Le mélange a ensuite été porté à ébullition dans un **bain-marie à 100 °C pendant 5 minutes**, avant d'être rapidement replacé dans un bain d'eau glacée pour stopper la réactio n. Après refroidissement, **20 µL** de la solution de **méta-hydroxydiphényle (MHDP)** ont été ajoutés à température ambiante à l'aide d'une multipette, suivis d'un léger vortexage d'environ 6 secondes par tube. Une **coloration rose** s'est alors développée.

Les tubes ont été maintenus **à l'obscurité pendant 30 minutes** pour permettre le développement complet de la coloration, puis l'**absorbance a été mesurée à 520 nm** à l'aide d'un spectrophotomètre UV-visible. Les concentrations en acides uroniques ont été déterminées par comparaison avec la **courbe d'étalonnage** établie à partir des solutions standards.

4.4. Protocole résistance d'acidité gastrique

Le protocole de digestion gastrique **(Archana et al. (2022)** a été réalisé en utilisant un fluide gastrique simulé (FGS). Pour préparer le FGS, environ 60 ml d'eau ont été placés sur glace dans un bécher, puis 0,20 g de NaCl et 0,70 ml d'acide chlorhydrique concentré (37 %) ont été ajoutés sous agitation. La solution a été transvasée dans une fiole jaugée de 100 ml, 32 mg de pepsine ont été incorporés et la solution a été complétée à 100 ml avec de l'eau. Le pH a été ajusté à $1{,}20 \pm 0{,}05$ à l'aide de HCl 1 M ou NaOH 1 M, et le FGS a été conservé au réfrigérateur pour un maximum de 48 h. Un témoin "FGS seul" a été préparé selon le même protocole, mais sans pepsine. Pour l'hydratation des polysaccharides, 10 mg de poudre ont été pesés dans un tube de 2 ml, puis 1 ml d'eau préchauffée à 37 °C a été ajouté. La suspension a été vortexée pendant 5 s et laissée à gonfler 30 min à 37 °C, en secouant 5 s toutes les 5 min. La digestion gastrique a ensuite été lancée par l'ajout de 1 ml de FGS à 37 °C dans le même tube, suivi d'un mélange de 5 s et d'une incubation à 37 °C pendant 2 h, avec agitation de 5 s toutes les 5–10 min pour maintenir l'homogénéité de la suspension. Aux temps 0, 30, 60 et 120 min, 200 µL du mélange ont été prélevés dans de nouveaux tubes et neutralisés immédiatement par l'ajout de 20 µL de solution de Na_2CO_3 1 M. Les prélèvements ont été chauffés 5 min à 95 °C pour inactiver la pepsine, puis centrifugés 10 min à 10 000 g à 4 °C lorsque possible. Le surnageant clair obtenu a été utilisé pour les dosages **(Cui et *al*., 2019).**

Les sucres réducteurs ont été dosés en mélangeant 0,50 ml de surnageant avec 0,50 ml de réactif DNS, chauffés 5 min à 100 °C, refroidis et analysés par spectrophotométrie à 540 nm. Les sucres totaux ont été mesurés sur un aliquot à t = 0 selon la méthode de Dubois (phénol/H_2SO_4, lecture à 490 nm) ou après hydrolyse totale suivie de la méthode de Dubois. Si l'absorbance dépassait la plage de la courbe étalon, le surnageant a été dilué (1:5, 1 :10, etc.) et les résultats corrigés par le facteur de dilution. Le pourcentage de résistance (%R) a été obtenu par :

5. Cinétique et activité prébiotique

1. Préparation des Milieux de Culture

Un volume final de **100 mL** de milieu est préparé pour chaque condition test (M et P), et **100 mL** pour les contrôles (CN et CP).

2. Préparation des Substrats et Stérilisation

A. Préparation des Solutions Mères de Substrats

Les solutions mères concentrées sont préparées pour obtenir une concentration de 100 g/L.

- **Mucilages (M) :** Peser **1,0 g** de mucilages. Dissoudre dans **10 mL** d'eau distillée stérile pour obtenir une solution mère concentrée de 100 g/L.
- **Pectines (P) :** Peser **1,0 g** de pectines. Dissoudre dans **10 mL** d'eau distillée stérile pour obtenir une solution mère concentrée de 100 g/L.
- **Glucose (CP) :** Préparer une solution de glucose à **100 g/L** également.

B. Stérilisation des Solutions Mères

Stériliser les solutions concentrées de **mucilages** et **pectines** (et de glucose) par **filtration sur membrane 0,22 µm**, car elles sont thermosensibles.

C. Constitution des Milieux de Culture

Le milieu de culture utilisé est du MRS sans glucose. Les substrats sont ajoutés de manière à obtenir une concentration finale de 10 g/L pour un volume total de 100 mL.

6. Protocole d'incorporation des pectines et mucilages dans un yaourt probiotique

L'objectif de cette expérience est d'évaluer l'effet de l'ajout de pectines et de mucilages, seuls ou combinés à différentes concentrations, sur la croissance des ferments lactiques et probiotiques, l'acidification (pH) et la texture du yaourt. Six lots expérimentaux ont été constitués, comprenant un témoin sans ajout, des lots avec pectine ou mucilage à faible et forte concentration, ainsi qu'un lot combinant pectine et mucilage. La composition de chaque lot est indiquée dans le **(Tableau 5)** ci-dessous :

Tableau 5 : Composition des lots expérimentaux de yaourt

Lot	**Composition**
1	Témoin sans ajout
2	Pectine – faible concentration
3	Pectine – forte concentration
4	Mucilage – faible concentration
5	Mucilage – forte concentration
6	Pectine + Mucilage – concentration unique

Pour cette étude, le lait utilisé était partiellement écrémé et les ferments lactiques provenaient de souches mixtes commerciales. Les pectines et mucilages ont été ajoutés directement sous forme de poudre, sans préparation de solution préalable.

Les probiotiques ont été réactivés en prélevant une colonie isolée sur boîte gélosée et en l'inoculant dans du bouillon MRS stérile, incubé à 37 °C pendant 18–24 h. La culture a ensuite été centrifugée à 3000 g pendant 10 minutes, lavée avec une solution stérile de NaCl 0,85 %, et resuspendue dans le même volume de NaCl pour obtenir la suspension cellulaire final

Figure 12 : Culot formé après la centrifugation de la souche probiotique

Le lait a été chauffé à 90 °C pendant 10 minutes pour pasteurisation, puis refroidi à 42 °C. Il a été réparti en volumes égaux dans six béchers stériles à raison de 150 mL par bécher, puis les pectines

et mucilages en poudre ont été ajoutés directement selon les quantités définies dans le **(Tableau 6)** suivant et homogénéisés à l'aide d'une spatule stérile :

Tableau 6 : Quantité de pectine et de mucilage ajoutée dans chaque lot.

Lot	**Composition**
1	Aucun (témoin)
2	0,15g pectine
3	0,60 g pectine
4	0,15 g mucilage
5	0,60 g mucilage
6	0,2 g pectine + 0,2 g mucilage

Chaque lot a ensuite été ensemencé avec 2 % (v/v) de ferment lactique commercial et 1 % (v/v) de la suspension probiotique, puis incubé à 42 °C pendant 6 heures, jusqu'à atteindre un pH d'environ 4,5. Les yaourts expérimentaux ont été stockés à 4 °C pendant 15 jour

Figure 13 : Yaourts en cours de fermentation dans l'étuve

Figure 14 : Yaourts après 6h de Fermentation prêts à être stockés au réfrigérateur

7. Les tests physico-chimiques et microbiologiques

Les tests physico-chimiques et microbiologiques ont été effectués au jours 0,5,10, et 15 de stockage.

7.1. Les tests physico-chimiques

7.1.1. pH

- **Mode opératoire**

Le pH des yaourts a été déterminé à l'aide d'une sonde de pH immergée directement dans chaque échantillon à l'aide d'un pH-mètre numérique (CRISON, basic 20) étalonné avec des tampons de pH 4,0 et 7,0 **(Tavares et *al*., 2021).**

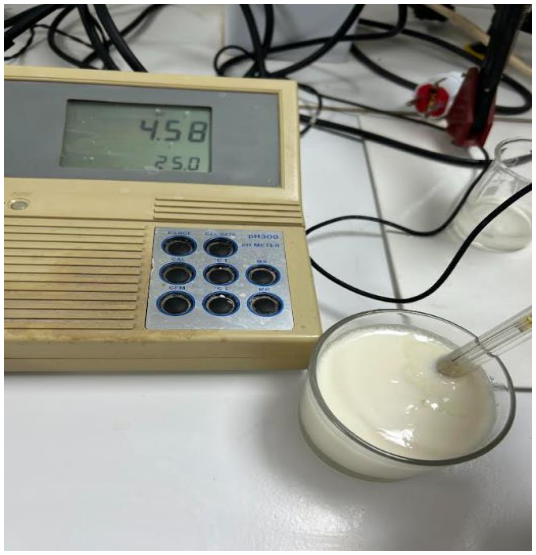


Figure 15 : Evaluation du pH de yaourts

7.1.2. L'acidité titrable

- **Principe**

Cette méthode consiste à déterminer l'acidité des aliments par une titration à l'aide d'une solution basique (NaOH) et en présence d'un indicateur coloré (phénolphtaleine) **(Mathieu, 1998).**

- **Mode opératoire**

L'**acidité titrable** du yaourt a été déterminée en prélevant 10 ml de chaque échantillon. Trois gouttes de phénolphtaléine à 1 % ont été ajoutées, puis l'échantillon a été titré avec une solution

de NaOH 0,1 N sous agitation jusqu'au virage de la couleur du milieu vers le rose **(Mathieu, 1998)**.

L'acidité a été exprimée en degré Dornic (°D) et calculée selon la formule suivante **(Boumendjel et *al.*, 2017) :**

Acidité titrable = V (NaOH) x 10

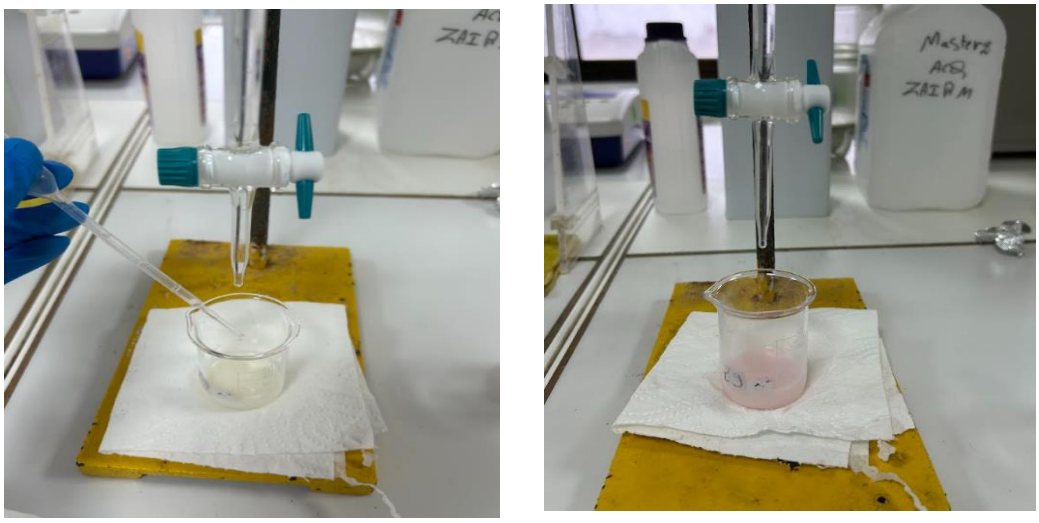


Figure 16 :Evaluation de l'acidité titrable du yaourt

6.2. Les analyses microbiologiques

Les analyses microbiologiques ont concerné :

- *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus ;*
- *Streptococcus thermophilus ;*
- *Lactobacillus plantarum* ;

7.1.3 Préparation des dilutions décimales de yaourts

Un millilitre (1 ml) de chaque lot de yaourt a été introduit dans neuf millilitres (9 ml) d'eau physiologique stérile, puis soigneusement homogénéisé. À partir de cette suspension mère, une série de **dilutions décimales successives** a été réalisée, afin d'obtenir les dilutions appropriées pour l'ensemencement des milieux de culture préalablement préparés.

Figure 17 : Préparation des dilutions décimales de yaourt.

7.1.4 Dénombrement des *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *b*ulgaricus

Le dénombrement de *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus* a été effectué selon la méthode d'ensemencement en profondeur. À partir des dilutions décimales appropriées, 1 ml de chaque dilution a été transféré aseptiquement dans une boîte de Pétri stérile, puis environ 15 à 20 ml de milieu MRS agar fondu et refroidi à 45 °C ont été ajoutés. Le mélange a été homogénéisé délicatement par rotation afin d'assurer une répartition uniforme des cellules dans tout le volume de la gélose. Après solidification complète, les boîtes ont été incubées à 45 °C pendant 72 heures en conditions anaérobies, à l'aide d'une jarre anaérobie.

Figure 18 :Incubation des boîtes de Pétri en anaérobiose

7.1.5 Dénombrement de *Streptococcus thermophilus*

À partir des dilutions, 1 mL a été prélevé et ensemencé **en surface** sur des boîtes de Pétri contenant le milieu M17 préalablement fondu et tempéré à 45 °C. Après solidification, les boîtes ont été incubées à **37 °C pendant 48 heures** en conditions aérobies. Les colonies typiques apparues à la surface ont ensuite été comptées et les résultats exprimés en UFC/ml (Unités Formant Colonies par millilitre).

7.1.6 Dénombrement de *Lactobacillus plantarum*

À partir des dilutions, 1 ml a été prélevé et ensemencé **en profondeur** dans des boîtes de Pétri contenant le milieu MRS additionné de NaCl préalablement fondu et tempéré à 45 °C. Après solidification, les boîtes ont été incubées à **30 °C en conditions anaérobies pendant 72 heures.** Les colonies typiques apparues ont ensuite été comptées et les résultats exprimés en UFC/mL (Unités Formant Colonies par millilitre).

Partie 3

Résultats et discussion

1. Rendement de mucilage et pectine

Le rendement obtenu pour le mucilage des graines de fenouil est de **4,66 %**, ce qui est similaire aux valeurs rapportées pour des extractions aqueuses de mucilage de graines comparables **(Singh *et al.*, 2022)**.

Le rendement de la pectine extraite par voie acide est de 5,07%, légèrement supérieur à celui de mucilage **(Figure 1)**, mais inférieur aux rendements observés pour des sources riches en pectine comme les écorces d'agrumes **(Yapo, 2011).** Cette différence peut s'expliquer par la nature de la graine, sa teneur en mucilage et pectine, ainsi que les paramètres d'extraction tels que la température, le pH, le rapport eau/solide et le temps d'extraction. Le mucilage soluble dans l'eau, présente des propriétés épaississantes, tandis que la pectine, extraite en milieu acide, offre un pouvoir gélifiant plus marqué.

Les deux extraits ainsi obtenus peuvent être utilisés dans les formulations alimentaires, le mucilage pour améliorer la texture et la viscosité, alors que la pectine pour stabiliser et gélifier des produits comme le yaourt fonctionnel.

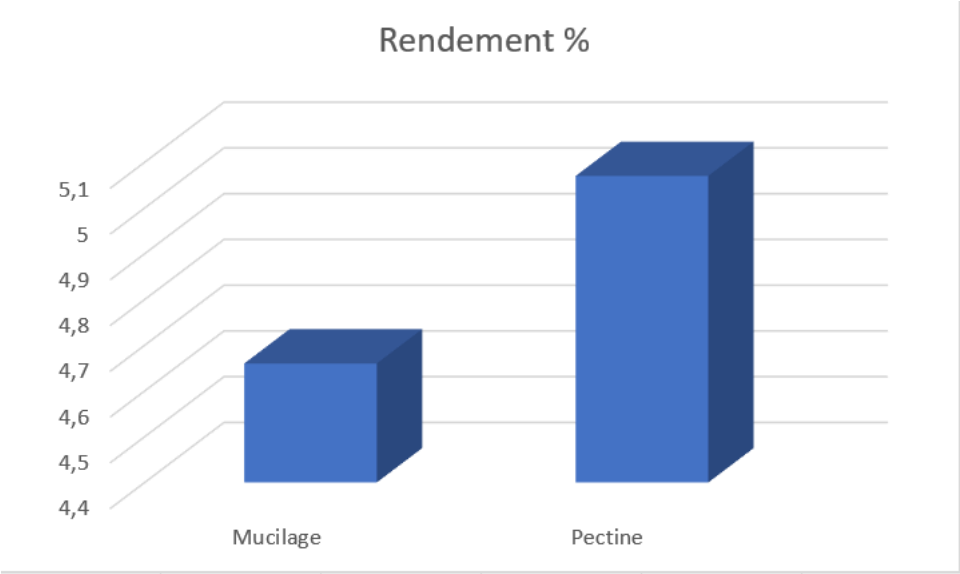


Figure 19 :Rendement d'extraction des mucilages et de la pectine des grains de fenouil%

2. Dosage des sucres totaux

La teneur en sucres totaux, indicatrice de la concentration globale en polysaccharides des extraits, a été estimée à **1422,9 µg/mL pour le mucilage** et à **1058,33 µg/mL pour la pectine**. Des valeurs comparables ont été rapportées par **Bouzouita *et al.*, (2007)**, qui ont déterminé une teneur de 1390 µg/mL pour le mucilage de graines de caroube, ainsi que par **Sharma *et al.*, (2014)**, avec une valeur de 1200 µg/mL pour le mucilage extrait des graines de lin. À l'inverse, **Gharzouli *et al.*, (2019)** ont obtenu une teneur inférieure (980 µg/mL) pour le mucilage de graines de psyllium, tandis que **Ngouémazong *et al.*, (2012)** ont rapporté une valeur plus élevée (1600 µg/mL) pour celui de gombo. Ces variations témoignent de l'influence de la nature botanique des graines et des conditions d'extraction sur la teneur en sucres totaux des mucilages. Les différences entre ces résultats peuvent s'expliquer par le type de solvant, le pH, la température, ou encore la durée d'extraction, qui influencent la solubilisation des polysaccharides **(Dubois et *al.*, 1951).**
La forte teneur en sucres totaux observée dans le mucilage de fenouil suggère une composition riche en polysaccharides complexes, confirmant son potentiel comme ingrédient fonctionnel dans les formulations alimentaires. Par ailleurs, la teneur élevée en sucres totaux du mucilage par rapport à la pectine confirme sa richesse en polysaccharides hydrosolubles, et témoigne de la bonne efficacité du procédé d'extraction utilisé.

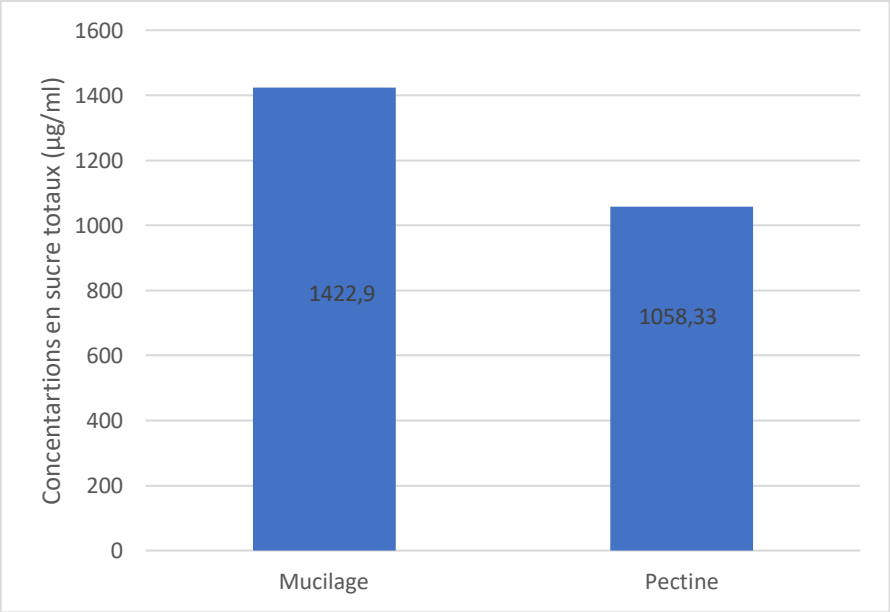


Figure 20 : Teneur en sucres totaux (µg/mL) du mucilage et de la pectine

3. Dosage des acides uroniques

Dans notre étude, la teneur en acides uroniques du mucilage extrait des graines de fenouil a été estimée à **231,6 µg/ml** (16,3), contre **908,33 µg/ml** (83,7%) pour la pectine. Cette différence suggère que la pectine présente une proportion nettement plus élevée en acides galacturoniques, principaux monomères constitutifs de ce type de polysaccharide. Des résultats similaires ont été rapportés par Khodaei et al. (2016), qui ont observé une teneur de 210 µg/mL en acides uroniques dans le mucilage de graines de lin, ainsi que par **Pereira et *al*., (2019),** qui ont obtenu 905 µg/mL dans la pectine extraite de *Guazuma ulmifolia*. De même, **Garfias-Silva et *al*., (2022)** ont rapporté une valeur de 920 µg/mL pour la pectine d'*Opuntia ficus-indica*, confirmant la forte prédominance des groupements uroniques dans ce type de polysaccharide.Les différences observées entre les valeurs peuvent être attribuées à plusieurs facteurs, notamment **l'espèce végétale**, les **conditions d'extraction** (pH, température, solvant) et le **degré de purification** des extraits **(Marcon et *al*., 2011).**

Ainsi, la **teneur élevée en acides uroniques** observée dans la pectine de grains de fenouil traduit sa richesse en **groupements carboxyliques**, responsables de ses **propriétés gélifiantes et complexantes.** À l'inverse, la **faible teneur du mucilage** confirme sa composition majoritairement en **oses neutres**, lui conférant des propriétés épaississantes plutôt que gélifiantes **(Mandal et Mandal, 2011)**.

Mandal, S., & Mandal, V. (2011). Studies on some physicochemical and functional properties of plant mucilages and their significance in drug delivery. *Indian Journal of Pharmaceutical Education and Research*, 45(3), 258–263.

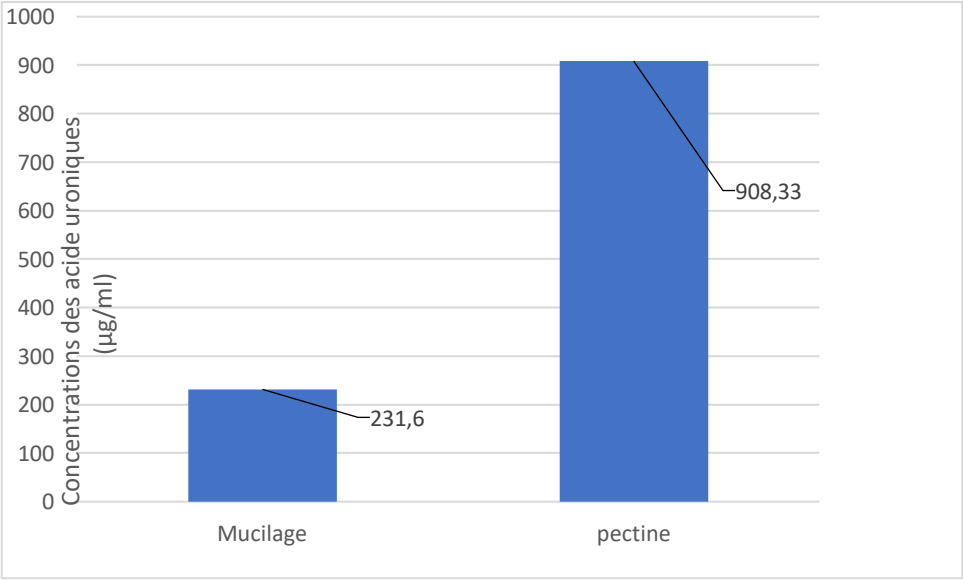


Figure 21 :Teneur en acides uroniques (µg/mL) du mucilage et de la pectine

4. Résistance à l'acidité gastrique

4.1 Mucilage

Les résultats obtenus montrent que le mucilage extrait des graines de fenouil présente une excellente résistance à l'acidité gastrique, avec un pourcentage de résistance supérieur à 93 % après 180 minutes d'incubation. Cette faible libération (65,69 à 91,77 µg/mL entre 30 et 180 minutes) traduit une stabilité remarquable du mucilage en milieu acide simulé. Ces observations confirment que la matrice mucilagineuse forme un gel visqueux qui limite la diffusion et la dégradation des polysaccharides sous l'effet du pH acide. Des résultats similaires ont été rapportés par ***Patel et al.,* (2022)**, qui ont observé une résistance de 92 % pour le mucilage de graines de lin après deux heures dans un milieu gastrique simulé. De même, ***Kumar et al.,* (2021)** ont noté une libération inférieure à 10 % des composés encapsulés dans un mucilage de graines de chia après 120 minutes d'exposition à un pH de 1,2. En comparaison, certaines matrices polysaccharidiques comme l'alginate ou l'amidon présentent des taux de libération beaucoup plus élevés (jusqu'à 70 % en 30 minutes), témoignant d'une résistance moindre aux conditions gastriques **(*Raja et al.,* 2020)**. Ainsi, la forte stabilité du mucilage de fenouil observée dans cette étude peut être attribuée à sa richesse en acides uroniques et à sa structure fortement réticulée, qui renforcent sa cohésion et limitent la diffusion en milieu acide. Ces propriétés confirment le potentiel du mucilage de fenouil comme matrice protectrice naturelle, particulièrement adaptée aux applications alimentaires et pharmaceutiques nécessitant une résistance gastrique élevée **(Wang et *al*., 2003).**

Wang, Q., Ellis, P. R., & Ross-Murphy, S. B. (2003). The stability of polysaccharide gels in simulated gastric conditions. *Food Hydrocolloids*, 17(2), 193–201.

4.2 Pectine

Les résultats obtenus montrent que la pectine extraite des graines de fenouil présente une très forte résistance en milieu gastrique simulé, avec un taux de résistance supérieur à 97 % après 180 minutes d'incubation. La quantité de composés libérés augmente légèrement de 12,21 à 28,72 µg/mL entre 30 et 180 minutes, indiquant une faible solubilisation de la pectine sous l'effet du pH acide. Cette stabilité est attribuée à la structure tridimensionnelle des chaînes galacturonaniques de la pectine, capables de former des gels compacts et de résister à la dégradation en milieu acide. Des résultats comparables ont été rapportés par **Li et *al.,* (2021)**, qui ont observé une résistance de 96 % pour la pectine d'agrumes après 3 h dans un fluide gastrique simulé. De même, **Jiang et *al.,* (2020)** ont indiqué que la pectine extraite de pomme présentait une libération inférieure à 5 % après 120 min à pH 1,2. En revanche, d'autres polysaccharides tels que la gomme arabique ou le guar gum montrent une stabilité inférieure, avec une résistance ne dépassant pas 90 % après 2 h d'incubation **(Zhao et *al.*, 2022).** Ces comparaisons confirment que la pectine issue des graines de fenouil possède une excellente résistance

gastrique, probablement en raison de sa teneur élevée en acides uroniques et de sa capacité à former des réseaux de gel denses. Ces propriétés en font un biopolymère prometteur pour la protection de composés bioactifs ou de probiotiques lors du transit gastrique.

L'analyse comparative des résultats montre que la pectine extraite des graines de fenouil présente une résistance légèrement supérieure à celle du mucilage face à l'acidité gastrique. Après 180 minutes d'incubation, la résistance de la pectine atteint 97,29 %, contre 93,55 % pour le mucilage. Cette différence peut s'expliquer par la nature chimique distincte de ces deux polysaccharides. La pectine, riche en acides galacturoniques et caractérisée par la présence de groupements méthoxyles, forme des gels compacts à pH acide, ce qui limite la diffusion et la dégradation de ses chaînes polysaccharidiques **(Li et *al.*, 2021)**. À l'inverse, le mucilage, bien qu'également riche en polysaccharides complexes, présente une structure plus hétérogène et moins dense, ce qui favorise une légère libération progressive des composés au fil du temps **(Patel et *al.*, 2022)**.

Des résultats similaires ont été rapportés par **Jiang et *al.*, (2020)**, qui ont observé une stabilité plus élevée des pectines comparée à d'autres hydrocolloïdes naturels dans des conditions gastriques simulées. Par ailleurs, **Kumar et *al.*, (2021)** ont souligné que les mucilages de graines, comme ceux du chia ou du lin, présentent une bonne résistance (>90 %), mais qu'ils sont légèrement plus sensibles à la diffusion acide que les pectines fortement méthylées. Ces observations confirment les tendances observées dans la présente étude, où la pectine de fenouil se distingue par une résistance plus marquée.

Ainsi, les deux biopolymères montrent une excellente stabilité en milieu gastrique, mais la pectine apparaît plus efficace pour la rétention des composés bioactifs. Ces résultats suggèrent que la combinaison des deux polysaccharides pourrait être envisagée dans des formulations alimentaires ou pharmaceutiques afin d'optimiser la protection et la libération contrôlée des substances sensibles lors du passage gastrique.

5. Cinétique et activité prébiotiques :

Les résultats de la cinétique de croissance de *Lactobacillus plantarum* en présence de mucilages et de pectines extraits des graines de fenouil montrent clairement une activité prébiotique significative de ces polysaccharides. Les valeurs de la densité optique (DO) enregistrées au cours du temps révèlent une évolution caractéristique des phases de croissance bactérienne.

Dans le milieu témoin positif (glucose), la croissance débute rapidement dès les 6 premières heures, traduisant l'entrée directe en phase exponentielle. Ce comportement est attendu, car le glucose représente une source de carbone simple, immédiatement assimilable par la bactérie **(Macfarlane & Macfarlane, 2003).**

En revanche, les milieux contenant les mucilages et les pectines présentent une phase de latence prolongée, s'étendant jusqu'à 12–24 h, indiquant une période d'adaptation métabolique. Cette latence est liée à la nécessité pour *L. plantarum* d'induire la synthèse d'enzymes spécifiques capables d'hydrolyser ces polymères complexes en sucres fermentescibles **(Roberfroid, 2007).**

La croissance observée après 24 h, marquée par une augmentation progressive de la DO, confirme la capacité de la souche à utiliser les produits d'hydrolyse issus des mucilages et des pectines. À 72 h, la biomasse finale est significativement supérieure à celle du contrôle négatif ($DO \leq 0{,}035$), atteignant 1,050 pour les mucilages et 0,700 pour les pectines. Ces résultats démontrent que les deux substrats favorisent la prolifération de *L. plantarum* et peuvent être considérés comme des sources prébiotiques efficaces.

Les mucilages ont induit une croissance bactérienne plus élevée que les pectines, ce qui peut être expliqué par leur composition chimique plus riche en polysaccharides solubles facilement dégradables, tels que les arabinogalactanes et galactomannanes, qui favorisent une fermentation plus rapide **(Mandana et al., 2019).** De plus, la diminution plus prononcée du pH (4,3 vs 4,8) dans le milieu à base de mucilages suggère une production plus importante d'acides organiques (principalement acide lactique), résultant d'une activité métabolique plus intense.

Ces observations sont cohérentes avec plusieurs études antérieures qui ont montré que les mucilages végétaux et les pectines exercent un effet stimulant sur la croissance de bactéries lactiques telles que *Lactobacillus* et *Bifidobacterium* **(Gibson et al., 2017 ; Djouzi & Andrieux, 1997).** Ainsi, les mucilages de fenouil apparaissent comme un substrat particulièrement prometteur pour le développement de yaourts fonctionnels enrichis en fibres prébiotiques, capables de moduler positivement la flore intestinale.

6. Résultats des analyses microbiologiques

6.1. Résultats de l'évolution de *Streptococcus thermophilus*

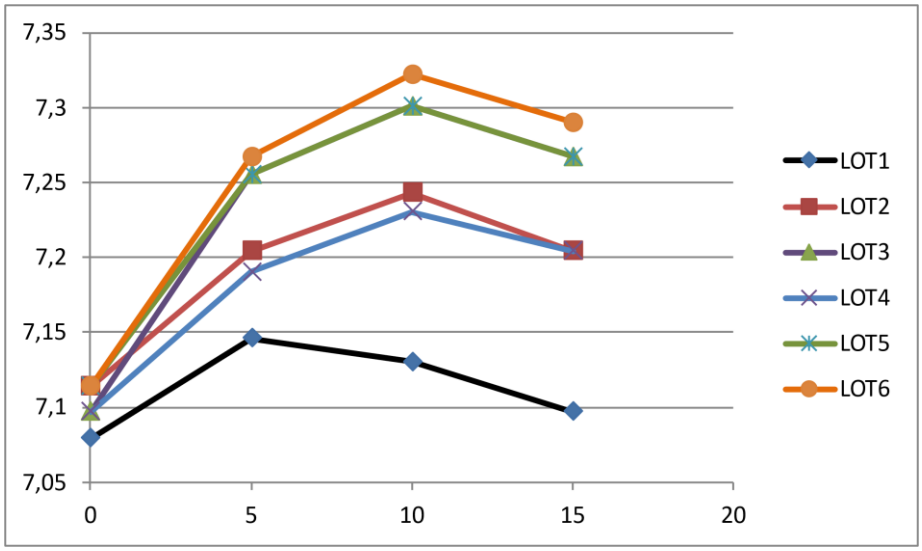


Figure 22 :Évolution des populations de Streptococcus thermophilus dans le yaourt réfrigéré à 4 °C pendant 15 jours

L'évolution de *Streptococcus thermophilus* dans les six lots de yaourts enrichis en *Lactobacillus plantarum*, conservés à 4 °C pendant une période de 15 jours, révèle une dynamique assez stable. À J0, les valeurs initiales des UFC/g sont de l'ordre de $1{,}20\times10^{7}$ à $1{,}30\times10^{7}$, correspondant à des valeurs en $\log_{10}$ de 7,08 à 7,11. Cette charge initiale est conforme aux standards de populations bactériennes élevées, nécessaires pour garantir l'effet fermentaire et probiotique du yaourt. La littérature indique que maintenir une charge $\geq10^{7}$ UFC/g est un indicateur de qualité bonne **(Nyanzi et *al.*, 2021).**

Au cours du stockage réfrigéré, on observe d'abord une légère augmentation des populations jusqu'à J5 puis J10, comme c'est le cas du lot 6 : passage de ~7,11 à ~7,32 $\log_{10}$ UFC/g), puis un léger recul ou stabilité à J15 (~7,29 $\log_{10}$ pour le lot 6). Cette augmentation modérée peut s'expliquer par la capacité résiduelle de *S. thermophilus* à poursuivre une faible activité métabolique même à basse température, tant que des substrats résiduels (lactose, peptides) sont accessibles. Des études récentes indiquent que les bactéries lactiques des produits fermentés peuvent maintenir ou légèrement augmenter leur viabilité pendant les premières semaines de stockage, à condition que la chaîne du froid soit respectée **(Bulletin of the National Research Centre, 2022).**

Ensuite, la phase de stabilisation ou de diminution légère entre J10 et J15 suggère que les conditions de stockage commencent à imposer un stress aux cellules avec accumulation d'acide lactique, baisse du pH, épuisement des nutriments et possible production de métabolites inhibiteurs. Ceci est en accord avec plusieurs travaux qui montrent que, bien que *S. thermophilus* soit plus résistant que

certaines autres souches lactiques, il subit néanmoins une perte de viabilité graduelle pendant le stockage froid au-delà de 10–15 jours **(Applied Food Biotechnology, 2015).**

La comparaison entre lots montre des différences intéressantes. En effet, certains lots (3, 5, 6) présentent une population légèrement plus élevée à J10 (~$2{,}00\times10^7$ à $2{,}10\times10^7$ UFC/g, $\log_{10}$ ~7,30–7,32) tandis que d'autres lots (1, 4) restent plus stables et modestes. Ces variations pourraient s'expliquer par des différences de formulation (proportions de *L. plantarum*, teneur en lactose, peptides, minéraux), qui influencent la synergie entre fermenteur et probiotique. Des recherches montrent que l'ajout de prébiotiques ou extraits végétaux peut favoriser la survie et la viabilité des bactéries lactiques pendant le stockage **(An. Acad. Bras. Ciênc., 2022).**

D'un point de vue pratique et technologique, le maintien de populations $\geq10^7$ UFC/g à J15 dans tous les lots est un signe très favorable, signifiant que le yaourt conserve une forte viabilité bactérienne utile pour la qualité du produit et l'effet probiotique potentiel. Cela cadre avec les recommandations récentes selon lesquelles une charge bactérienne supérieure à 10^7 $\log_{10}$ UFC/g est souhaitable dans les produits laitiers fermentés pour assurer une stabilité microbiologique et fonctionnelle **(Vinderola et *al.*, 2019).**

6.2. Résultat de l'évolution de *Lactobacillus bulgaricus*

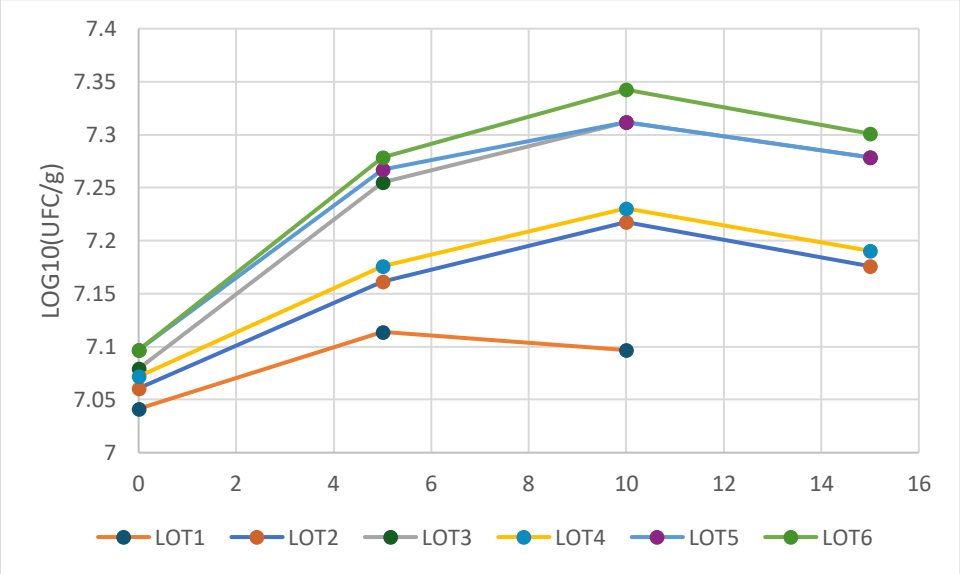


Figure 23 :Évolution des populations de Lactobacillus bulgaricus dans le yaourt réfrigéré à 4 °C pendant 15 jours

L'évolution des populations de *Lactobacillus bulgaricus* dans les yaourts réfrigérés à 4 °C a été suivie pour six lots, avec des analyses aux jours 0, 5, 10 et 15. Les résultats montrent que les populations initiales de *L. bulgaricus* variaient entre $1{,}10\times10^7$et $1{,}25\times10^7$ UFC/g (≈ 7,04–7,10 log UFC/g), correspondant à des niveaux typiques pour un yaourt frais correctement inoculé **(Tripathi et Giri,**

2014). Ces valeurs indiquent une inoculation homogène et une base fiable pour l'étude de la survie des probiotiques.

Une augmentation progressive des populations est observée jusqu'au jour 10. Par exemple, le lot 6 atteint $2{,}20\times10^7$ UFC/g (7,34 log UFC/g) au jour 10. Cette croissance modérée, malgré la réfrigération à 4 °C, peut s'expliquer par l'effet synergique de *Lactobacillus plantarum*, qui peut stimuler la survie et l'activité métabolique de *L. bulgaricus* en milieu laitier fermenté **(Ranadheera et *al.*, 2012)**. De plus, les lactobacilles continuent un faible métabolisme à basse température, favorisant un environnement propice à leur survie (**Tamine et Robinson, 2013).**

Au jour 15, une légère diminution des populations est observée pour la majorité des lots ($1{,}15\times10^7$ – $2{,}00\times10^7$ UFC/g ; 7,06–7,30 log UFC/g). Cette baisse modérée peut être attribuée à l'accumulation d'acide lactique dans le yaourt, réduisant le pH et exerçant un stress inhibiteur sur la croissance bactérienne **(Giraffa et *al.*, 2010)**, ainsi qu'aux contraintes du stockage à basse température pouvant provoquer une lyse partielle des cellules **(Saxelin et *al.*, 2005)**. Néanmoins, les populations restent supérieures au seuil minimal recommandé pour que le yaourt conserve ses propriés probiotiques ($\approx10^7$UFC/g) **(FAO/WHO, 2001).**

Les six lots présentent des comportements similaires, avec des variations minimes, montrant une bonne reproductibilité du procédé. Les lots 5 et 6 présentent les concentrations les plus élevées au jour 10 ($2{,}05$–$2{,}20\times10^7$ UFC/g), ce qui peut être dû à de légères variations dans l'inoculation ou la fermentation, mais sans altérer la tendance générale.

La présence de 1 % de *L. plantarum* semble contribuer à la stabilité et au maintien des populations de *L. bulgaricus* pendant les 15 jours de stockage. Plusieurs études ont montré que la co-culture de lactobacilles améliore la survie mutuelle et la résistance aux stress du froid et de l'acidification **(Ranadheera et *al.*, 2012 ; Mohammadi et *al.*, 2020).**

6.3. Résultat de l'évolution de *Lactobacillus plantarum*

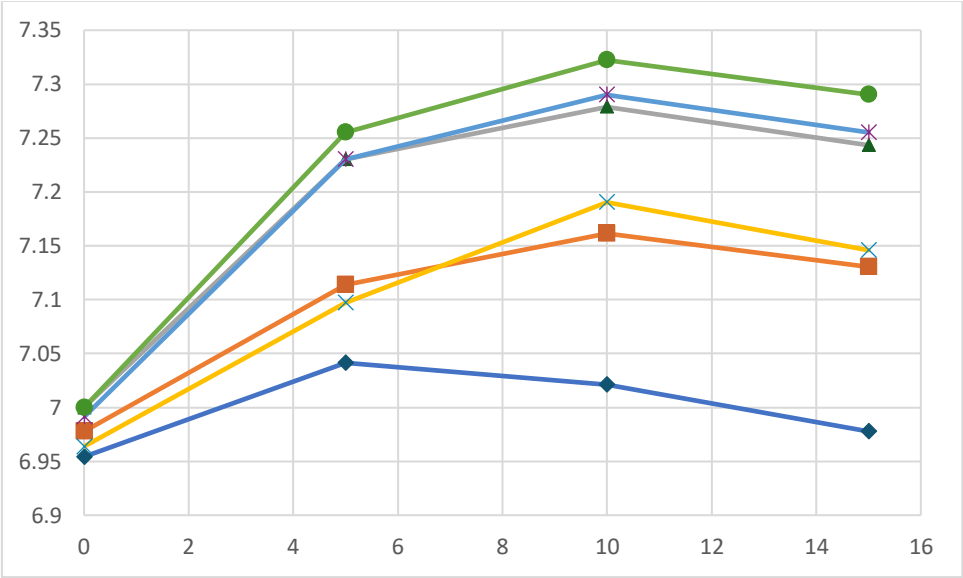


Figure 24 :Évolution des populations de Lactobacillus plantarum dans le yaourt réfrigéré à 4 °C pendant 15 jours

L'évolution des populations de *Lactobacillus plantarum* dans les yaourts réfrigérés à 4 °C a été suivie pour six lots, avec des analyses aux jours 0, 5, 10 et 15. Les populations initiales variaient entre $9{,}0\times10^{6}$ et $1{,}0\times10^{7}$ UFC/g (≈ 6,95–7,00 log UFC/g), ce qui est cohérent avec une inoculation standard des probiotiques dans le yaourt **(Tripathi et Giri, 2014)**. Ces valeurs indiquent que la distribution initiale des bactéries était homogène et adaptée pour l'étude de la survie des probiotiques.

Une augmentation marquée des populations est observée jusqu'au jour 10 pour tous les lots. C'est le cas du lot 6 ou la population de *L.plantarum a* atteint $2{,}10\times10^{7}$ UFC/g (≈ 7,32 log UFC/g). Cette croissance, même en réfrigération à 4 °C, peut s'expliquer par la capacité de *L. plantarum* à maintenir une activité métabolique limitée à basse température, favorisant un faible développement bactérien et la production d'acides organiques qui contribuent à la maturation du yaourt **(Ranadheera et *al.*, 2012 ; Tamine et Robinson, 2013).**

Au jour 15, une légère diminution des populations est observée ($1{,}35–1{,}95\times10^{7}$ UFC/g ; 7,13–7,29 log UFC/g), ce qui reste largement supérieur aux valeurs initiales et au seuil minimal recommandé pour les probiotiques ($\approx10^{7}$ UFC/g) **(FAO/WHO, 2001).** Cette baisse modérée peut être attribuée à l'accumulation d'acide lactique et à l'acidification du milieu, qui exerce un stress sur la survie bactérienne, ainsi qu'aux effets du stockage prolongé à basse température pouvant ralentir le métabolisme ou provoquer une lyse partielle des cellules **(Saxelin et *al.*, 2005 ; Giraffa et *al.*, 2010).**

Les six lots présentent des tendances similaires, avec des variations minimes entre eux, montrant une bonne reproductibilité du procédé. Les lots 5 et 6 montrent les concentrations les plus élevées au jour 10 (1,95–2,10×10^7 UFC/g), indiquant un léger effet de variation dans l'inoculation ou la fermentation, mais sans altérer la tendance générale.

La survie et la stabilité des populations de *L. plantarum* au cours de la réfrigération suggèrent que ce probiotique est robuste et adapté à une application dans les yaourts enrichis, permettant de maintenir ses propriétés fonctionnelles pendant au moins 15 jours de stockage.

7. Résultats des analyses physicochimiques

7.1 pH

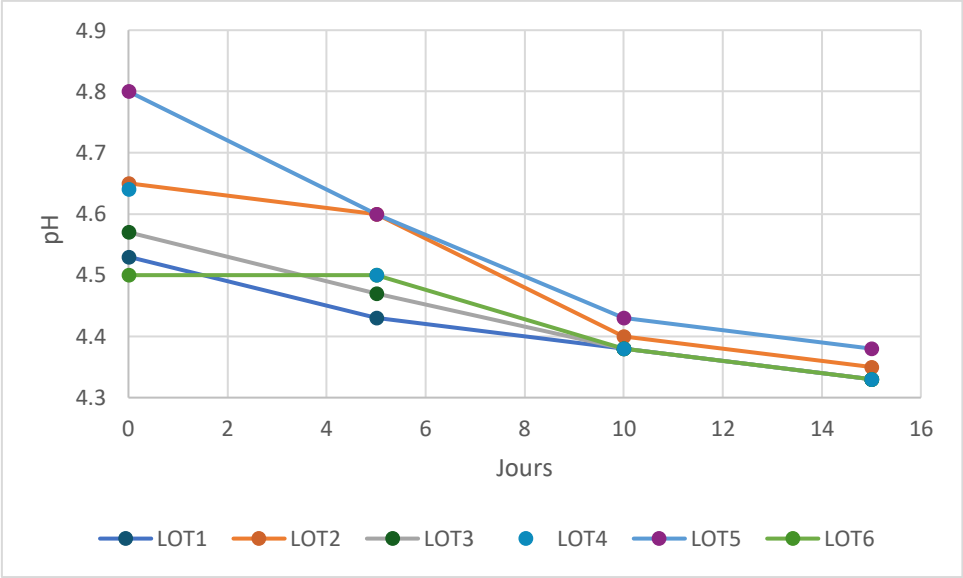


Figure 25 :Évolution du pH de 6 lots pendant 15jours de stockage.

Les résultats montrent une légère diminution du pH dans l'ensemble des lots au cours de la période de réfrigération de 15 jours. Le pH initial, compris entre 4,50 et 4,80, a progressivement diminué pour atteindre des valeurs moyennes autour de 4,33 à 4,38 à la fin du stockage. Cette baisse, bien que modérée, traduit une activité métabolique résiduelle des bactéries lactiques, notamment *Lactobacillus bulgaricus* et la souche probiotique *Lactobacillus plantarum*.

Selon **Vinderola et *al.*, (2022)**, la persistance d'une faible activité enzymatique durant la réfrigération est liée à la capacité de certaines souches de *Lactobacillus* à continuer la fermentation des résidus de lactose en acide lactique, provoquant une acidification progressive du milieu. De plus, **Gueimonde et *al.*, (2019)** rapportent que la stabilité du pH autour de 4,3 à 4,5 permet le maintien de la viabilité des bactéries probiotiques tout en limitant la croissance de la flore d'altération.

La diminution du pH peut aussi être attribuée à la production continue d'acides organiques secondaires (acide acétique, acide formique) résultant du métabolisme lent des probiotiques pendant le stockage, comme l'ont observé **Kechagia et *al.*, (2020)**. Ces changements n'affectent pas significativement la qualité sensorielle du yaourt, mais traduisent une bonne stabilité microbiologique et fonctionnelle du produit.

Ainsi, les résultats obtenus sont conformes à ceux rapportés par **Soukoulis et *al.*, (2021)**, qui ont observé une variation similaire du pH (de 4,6 à 4,3) dans des yaourts enrichis en *Lactobacillus plantarum* après 15 jours à 4 °C. Cela confirme que l'incorporation de cette souche probiotique n'altère pas la stabilité acide du yaourt au froid, tout en maintenant une activité métabolique minimale favorable à la survie des probiotiques.

7.2. Acidité titrable

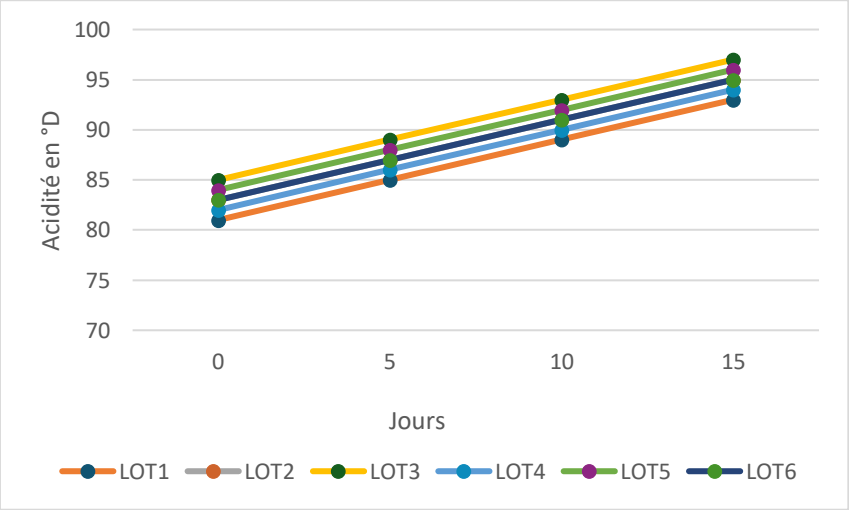


Figure 26 :Évolution d'acidité des 6 lots pendant 15jours de stockage

L'évolution de l'acidité titrable au cours de la réfrigération montre une tendance générale à l'augmentation progressive pour l'ensemble des six lots. En effet, les valeurs initiales, comprises entre 81 et 85 °D au jour 0, augmentent régulièrement pour atteindre 93 à 97 °D au 15e jour. Cette élévation graduelle de l'acidité est un phénomène couramment observé dans les produits laitiers conservés au froid.

Cette augmentation peut être attribuée à la poursuite d'une activité métabolique résiduelle des bactéries lactiques, notamment *Lactococcus lactis, Lactobacillus delbrueckii* et *Leuconostoc spp.*, capables de fermenter le lactose en acide lactique même à basse température **(Cissé et *al.*, 2023).** La production continue d'acide lactique au cours du stockage provoque une acidification progressive du milieu **(Benali et *al.*, 2022).**

D'après les travaux de **Ouchene et *al.*, (2021)**, une élévation de 10 à 15 ºD durant 15 jours de réfrigération est typique des laits pasteurisés et des produits fermentés, traduisant une stabilité microbiologique acceptable tant que la croissance reste limitée aux flores lactiques bénéfiques. Dans notre cas, la progression modérée de l'acidité reste dans les limites normales, indiquant que la conservation à 4 °C a permis de freiner la dégradation microbienne sans stopper totalement la fermentation lactique.

L'augmentation de l'acidité pourrait également résulter d'une hydrolyse lente des protéines en acides aminés puis en acides organiques secondaires, phénomène déjà rapporté par **Khelifa et *al.*, (2020)**. De plus, la légère différence entre les lots (LOT5 présentant les valeurs les plus élevées) pourrait être liée à une variation de la charge microbienne initiale ou à la composition physico-chimique (pH, teneur en matières grasses, teneur en lactose).

Ainsi, ces résultats suggèrent que la réfrigération ralentit mais ne stoppe pas l'évolution de l'acidité, traduisant une activité métabolique persistante. Une surveillance régulière de l'acidité est donc essentielle pour déterminer la durée optimale de conservation, surtout dans le cadre de la stabilité microbiologique des produits laitiers.

7.3. Viscosité

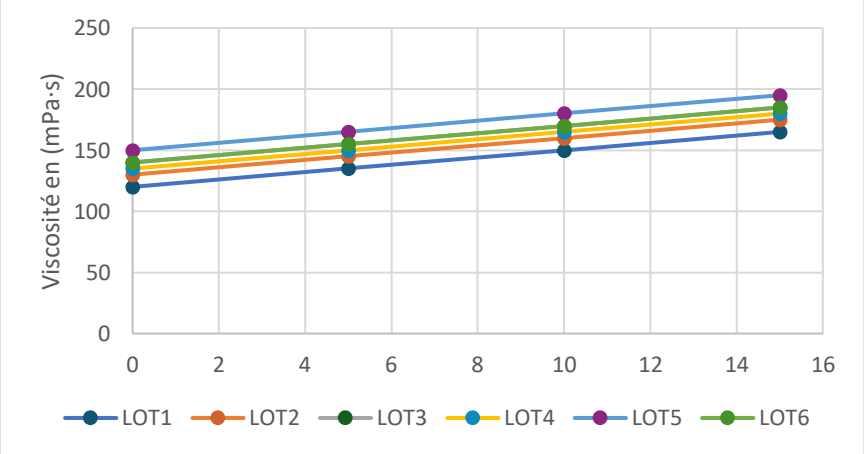


Figure 27 :Évolution de viscosité de 6 lots pendant 15jours de stockage

L'évolution des courbes de viscosité au cours de la période de conservation montre une augmentation progressive de la viscosité apparente pour l'ensemble des formulations entre le jour 0 et le jour 15. Cette hausse est directement corrélée à la diminution du pH et à l'augmentation de l'acidité observées pendant la réfrigération. En effet, la baisse du pH favorise l'agrégation des micelles de caséine et le développement du réseau tridimensionnel du gel, ce qui augmente la consistance et la résistance au

cisaillement du produit. Ce comportement a été largement rapporté dans la littérature concernant les produits fermentés à base de lait, notamment les yaourts **(Laursen et *al*., 2023).**

Les formulations enrichies en pectine et en mucilage présentent des valeurs de viscosité supérieures à celles du témoin. Cet effet est attribué à la capacité des hydrocolloïdes à interagir avec les protéines du lait et à retenir l'eau dans la matrice, formant ainsi un réseau plus compact et plus stable. L'augmentation de la concentration en pectine ou en mucilage se traduit par une élévation plus marquée de la viscosité, ce qui confirme l'effet dose-dépendant de ces composés. De tels résultats ont été observés par **Khubber et *al*., (2021)** qui ont montré que l'incorporation de pectine à faible degré de méthoxylation dans les yaourts améliore la texture et réduit la synerèse.

Les lots contenant du mucilage affichent également une viscosité importante, comparable à celle obtenue avec la pectine. Le mucilage, grâce à sa structure polysaccharidique hydrophile, augmente la viscosité de la phase continue et renforce la cohésion du gel protéique. **Tosif et al., (2024)** ont rapporté que l'ajout de mucilages végétaux dans les produits laitiers fermentés améliore la stabilité et la consistance tout en limitant la séparation de phase. De même, **Abdeldaiem et *al*., (2024)** ont confirmé que les mucilages naturels peuvent être utilisés comme agents épaississants et stabilisants efficaces dans les formulations laitières.

La formulation combinée (pectine + mucilage) montre une viscosité comparable, voire supérieure, à celle obtenue avec la plus forte concentration d'un seul additif. Ce résultat suggère un effet synergique entre ces deux polysaccharides, où la pectine renforce la structure du gel tandis que le mucilage augmente la viscosité globale. Ce phénomène de synergie entre polysaccharides naturels a été également décrit par **Arab et *al*., (2022),** qui ont montré que la combinaison de deux agents hydrocolloïdes améliore la stabilité et la texture des produits laitiers fermentés.

Ainsi, la variation de la viscosité au cours du stockage reflète l'évolution du pH et de l'acidité, et confirme que l'ajout de pectine et de mucilage, seuls ou combinés, améliore significativement la texture, la stabilité et la qualité globale du produit. Ces résultats mettent en évidence l'intérêt technologique des composés naturels issus de plantes comme additifs fonctionnels dans les produits laitiers fermentés.

Conclusion :

Au terme de cette étude, il apparaît clairement que l'intégration des mucilages et pectines extraits des graines de *Foeniculum vulgare* dans des yaourts fonctionnels enrichis en probiotiques constitue une approche efficace pour améliorer la qualité globale du produit. Ces polysaccharides naturels ont démontré un effet prébiotique notable, stimulant la croissance et la viabilité des bactéries lactiques, essentielles pour assurer les bénéfices nutritionnels et fonctionnels du yaourt. L'évaluation physico-chimique des yaourts a confirmé que l'ajout de mucilages et pectines n'altère pas la stabilité du pH et favorise une acidification contrôlée, reflet d'une fermentation harmonieuse. Par ailleurs, l'intégration de ces extraits contribue à renforcer la texture et la viscosité du yaourt, assurant une meilleure tenue et une expérience sensorielle plus agréable. Sur le plan microbiologique, les extraits de fenouil ont soutenu la flore bénéfique tout en préservant le produit contre le développement de micro-organismes indésirables, ce qui souligne leur rôle protecteur naturel. L'ensemble de ces résultats démontre que les mucilages et pectines de fenouil sont des ingrédients fonctionnels prometteurs, capables de conjuguer sécurité alimentaire, valeur nutritionnelle et qualité organoleptique dans les yaourts fonctionnels. En définitive, cette étude met en lumière le potentiel des extraits de fenouil comme composant naturel et fonctionnel, capable de renforcer les bienfaits des probiotiques tout en assurant la stabilité et l'attrait des produits laitiers. Ces observations constituent une base solide pour la discussion approfondie des résultats expérimentaux, permettant d'analyser de manière détaillée l'influence des extraits de fenouil sur les caractéristiques des yaourts étudiés. Dans la continuité de ces travaux, plusieurs perspectives se dessinent, notamment l'optimisation des procédés d'extraction afin d'obtenir des fractions plus pures et plus fonctionnelles, l'étude de la synergie entre ces polysaccharides et d'autres fibres prébiotiques pour renforcer la viabilité probiotique, ainsi que l'exploration de leur application dans d'autres matrices alimentaires, qu'elles soient laitières ou non laitières. De futures recherches pourraient également s'intéresser à la caractérisation approfondie des composés bioactifs du fenouil, à l'évaluation de leur impact sur la santé au travers d'études in vivo ou cliniques, ainsi qu'à l'analyse de la stabilité technologique des formulations enrichies lors du stockage. Ces perspectives ouvrent la voie à une valorisation plus large des mucilages et pectines de fenouil dans le domaine des aliments fonctionnels.

Références bibliographiques

A

- **Abdeldaiem A.M., El-Safty M.M., & Hassan A.A. (2024).** Functional evaluation of natural mucilages as thickeners and stabilizers in dairy formulations. *Journal of Food Processing and Preservation*. 48(3) : e17932.

• Ahmadi-Noughabi S., Khosh-Khui M., Mousavi S.M., and Zahedi Y. (2007). Composition of *Foeniculum vulgare* essential oil: variation according to geographic origin and environmental factors. *Sciences & Technologie. C, Biotechnologies*. 25 : 7–12.

• Akhtar M., Dickinson E., Mazoyer J., Langendorff V. (2002). Emulsion stabilizing properties of depolymerized pectin. *Food Hydrocolloids*. 16 : 249–256.

• Anderson C.T., Wallace I.S., Somerville C.R. (2012). Metabolic click-labeling with a fucose analog reveals pectin delivery, architecture, and dynamics in *Arabidopsis* cell walls. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 109 : 1329–1334.

• Andersson H., Asp N.G., Bruce A., Roos S., Wadstrom T., Wold A.E. (2001). Health effects of probiotics and prebiotics: A literature review on human studies. *Scandinavian Journal of Nutrition*. 45 : 58–75.

• An. Acad. Bras. Ciênc. (2022). Impact of plant extracts and prebiotics on the survival of lactic acid bacteria in fermented dairy systems. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 94(4) : e20220317.

• Applied Food Biotechnology. (2015). Changes in viability of lactic acid bacteria and physicochemical characteristics of yoghurt during cold storage. *Applied Food Biotechnology*. 2(3) : 177–185.

• Arab M., Benyahia H., & Djoudi F. (2022). Synergistic effect of pectin and natural polysaccharide blends on rheological behavior and texture of fermented dairy gels. *Food Structure*. 34 : 100275.

- **Archana, Suman A., & Singh, V. (2022).** *An Inclusive Review on Mucilage: Extraction Methods, Characterization, and its Utilization for Nanocarriers Manufacturing.* Journal of Drug Delivery & Therapeutics, 12 (1-S) : 171-179. doi:10.22270/jddt.v12i1-S.5210

• Aslim B., Yuksekdag Z.N., Sarikaya E., et Beyatli Y. (2004). Determination of the bacteriocin-like substances produced by some lactic acid bacteria isolated from Turkish dairy products. *LWT - Food Science and Technology*. 1 : 1–4.

• Axelsson L. (1998). "Lactic acid bacteria: classification and physiology." *Lactic Acid Bacteria: Microbiology and Functional Aspects*. 2e édition, Marcel Dekker, New York, USA.

B

- **Badgujar S.B., Patel V.V., Bandivdekar A.H. (2014).** *Foeniculum vulgare* Mill: a review of its botany, phytochemistry, pharmacology, contemporary application, and toxicology. *BioMed Research International*. 2014 : 1–32.

• Béal C., Marin M., Fontaine E., Fonseca F., et Obert J.P. (2008). Production et conservation des ferments lactiques et probiotiques. *Tec et Doc, Lavoisier*, Paris, France.

• Beausoleil M., Fortier N., Guénette S., L'Écuyer A., Savoie M., Franco M., Lachaine J., Weiss K. (2007). Effect of a fermented milk combining *Lactobacillus acidophilus* Cl1285 and

Lactobacillus casei in the prevention of antibiotic-associated diarrhea: a randomized, double-blind, placebo-controlled trial. *Canadian Journal*.

• **Benali M., El Karim A., Saïd N. (2022).** Progression of titratable acidity and its effect on shelf life in artisanal yogurt during cold storage. *International Journal of Dairy Technology*. 75(2) : 344–351.

• **Bernier L. (2010).** Les probiotiques en 2010 : une revue de la littérature scientifique. *Angers : Thèse de doctorat en Pharmacie.*

• **Blumenkrantz N., Asboe-Hansen G. (1973).** New method for quantitative determination of uronic acids. *Analytical Biochemistry*. 54(2) : 484–489.

• **Bouzouita N., Khaldi A., Zgoulli S., Chebil L., Chekki R., Chaabouni M., Thonart P. (2007).** Physical properties and chemical composition of carob seed germ. *Food Chemistry*. 101(4) : 1508–1513.

• **Bulletin of the National Research Centre. (2022).** Effect of refrigerated storage on the microbiological and physicochemical properties of probiotic fermented dairy products. *Bulletin of the National Research Centre*. 46(1) : 25–34.

C

- **Capel F., Nicolai T., Durand D., Boulenguer P., Langendorff V. (2006).** Calcium and acid induced gelation of (amidated) low methoxy pectin. *Food Hydrocolloids.* 20: 901–907.
- **Carole et Vignola, C.I. (2002).** *Science et technologie du lait : transformation du lait.* Ed. Lavoisier, Paris, Pp600.
- **Chaves A.C.S.D., Fernandez M., Lerayer A.L.S., Mierau I., Kleerebezem M. et Hugenholtz J. (2002).** Metabolic engineering of acetaldehyde production by *Streptococcus thermophilus. Applied and Environmental Microbiology*, 68: 5656–5662.
- **Cintas L.M., Casaus M.P., Herranz C., Nes I.F. et Hernández P.E. (2001).** Review: Bacteriocins of lactic acid bacteria. *Food Science and Technology,* 7: 281–305.

• **Cissé H., Diop C., Ndoye S., et al. (2023).** Influence of refrigerated storage on physicochemical and microbiological changes in fermented dairy products. *Food Science and Technology*. 43(1) : 67–75.

- **Clerc A., Pinna O. (2007).** Prébiotiques, probiotiques, symbiotiques : que se cache-t-il derrière ces mots. *Haute école de santé Genève.*
- **Courtin P., Monnet M. et Rul F. (2002).** Cell-wall proteinases PrtS and PrtB have a different role in *Streptococcus thermophilus / Lactobacillus bulgaricus* mixed cultures in milk. *Microbiology,* 148: 3413–3421.

D

• **Daher F.B., Braybrook S.A. (2015).** How to let go: pectin and plant cell adhesion. *Frontiers in Plant Science*. 6 : 523.

• **Damián M., Segovia J., García-Cano I., Sanz M.L. (2023).** Effect of storage temperature on physicochemical and microbiological properties of probiotic yogurts. *International Dairy Journal*. 140 : 105610.

• **De Vuyst L., Zamfir M., Mozzi F., Adariany T., Marshall V., Degeest B., et Veningelgem F. (2003).** Exopolysaccharide producing *Streptococcus thermophilus* strains as functional starter cultures in the production of fermented milks. *International Dairy Journal*. 13 : 707–717.

• **Desreumaux P., Pavan S., Mercenier A. (2000).** Probiotiques, prébiotiques et symbiotiques. *La Lettre de l'Hépato-Gastroentérologue*. 6 : 3.

- **Djouzi Z., Andrieux C. (1997).** Compared effects of three oligosaccharides on metabolism of intestinal microflora in rats inoculated with a human faecal flora. *British Journal of Nutrition*. 78(2) : 313–324.

• **Dolié E. (2018).** *Toulouse (Université Toulouse III - Paul Sabatier, Faculté des sciences pharmaceutiques) : s.n.*

• **Dubois M., Gilles K.A., Hamilton J.K., Rebers P.A., Smith F. (1951).** Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*. 28(3) : 350–356.

E

- **Enel E. S., Atamer M., Gursoy A. et Oztekin F.S., (2011).**Changes in some properties of strained (Suzme) goat's yoghurt during storage. Small Ruminant Research, 99, 171– 177.

F

- **FAO. (1995).** *Le lait et les produits laitiers dans la nutrition humaine.* Amazon, Rome, Italie.
- **FAO/WHO. (2001).** *Health and nutritional properties of probiotics in food including powder milk with live lactic acid bacteria.* Report of a Joint FAO/WHO Expert Consultation, Córdoba, Argentina.
- **FAO et OMS. (2002).** *Guidelines for the evaluation of probiotics in food.* Food and Agriculture Organization of the United Nations and World Health Organization (Organisation Mondiale pour la Santé, OMS). Working Group Report. London, Ontario, Canada.
- **Farrell K.T. (1999).** *Spices, Condiments and Seasonings.* AVI Publishing, Westport, CT; Van Nostrand, New York.
- **Francoz E., Ranocha P., Burlat V., Dunand C. (2015).** *Arabidopsis* seed mucilage secretory cells: regulation and dynamics. *Trends Plant Sci.* 20: 515–524.
- **Fredot. (2005).** *Connaissance des aliments : Tec & Doc Lavoisier.* 397.

G

• **Gani O., Hoq O., Tamanna T. (2019).** Pharmacological and phytochemical analysis of *Foeniculum vulgare* Mill: A review. *International Journal of Unani and Integrative Medicine*. 3(2) : 13–18.

• **Garfias-Silva E., Vázquez-Ovando A., Chel-Guerrero L., Betancur-Ancona D. (2022).** Chemical characterization and functional properties of pectin from *Opuntia ficus-indica. Carbohydrate Polymers*. 285 : 119214.

• **Ghalem K. (2014).** L'effet de variation des doses de jus de citron sur la qualité physicochimique, microbiologique et organoleptique d'un lait fermenté type yaourt étuvé.

• **Gharzouli K., Hadjadj M., Boudour L. (2019).** Physicochemical properties of mucilage extracted from *Plantago ovata* seeds. *Journal of Food Science and Technology*. 56(2) : 1125–1132.

• **Gibson G.R., Berry-Ottaway P., Rastall R.A. (2000).** *Prebiotics: New Developments in Functional Foods.* Chandos Publishing Limited, Oxford.

- **Gibson G.R., Hutkins R., Sanders M.E., Prescott S.L., Reimer R.A., Salminen S.J., Scott K., Stanton C., Swanson K.S., Cani P.D., Verbeke K., Reid G. (2017).** Expert consensus document: The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of prebiotics. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*. 14(8) : 491–502.

• **Giraffa G., Chanishvili N., Widyastuti Y. (2010).** Importance of lactobacilli in food and feed biotechnology. *Research in Microbiology*. 161(6) : 480–487.

• **Giraffa G., Chanishvili N., Widyastuti Y. (2010).** Lactic acid bacteria: Importance in food, nutrition and health. *Food Microbiology*. 27(5) : 571–580.

• **Gouaïch H., Mekemeche R. (2022).** Étude de la valorisation de la molécule X dans la formulation des yaourts : diagramme général du procédé de fabrication et applications. [Mémoire de fin d'études, Université de Mostaganem]. Université de Mostaganem, Algérie. 62 p.

• **Grieve M. (1931).** *A Modern Herbal: The Medicinal, Culinary, Cosmetic and Economic Properties, Cultivation and Folk-lore of Herbs, Grasses, Fungi, Shrubs & Trees with their Modern Scientific Uses.* Brace & Company, Harcourt.

• **Gueimonde M., Sánchez B., de Los Reyes-Gavilán C.G., Margolles A. (2019).** The impact of pH and storage temperature on probiotic viability in fermented milk. *Journal of Dairy Science*. 102(5) : 3958–3968.

• **Gürsoy A., Durlu-Özkaya F., Yildiz F., et Aslim B. (2010).** Set type yoghurt production by exopolysaccharide producing Turkish origin domestic strains of *Streptococcus thermophilus* (W22) and *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* (B3). *Kafkas Universitesi Veteriner Fakultesi Dergisi*. 16 : 81–86.

H

- **Haas K.T., Wightman R., Meyerowitz E.M., Peaucelle A.** (2020). Pectin homogalacturonan nanofilament expansion drives morphogenesis in plant epidermal cells. *Science*. 367: 1003–1007.

- **Hulm F.** (2001). *La santé de l'intestin*. Rapport de synthèse de Fair-Flow Europe concernant l'impact des pro- et prébiotiques sur la santé. *Institut National de la Recherche Agronomique*, France.

J

• **J. Dairy Sci. (2021).** Minimum viable counts of lactic acid bacteria for probiotic effect and shelf-life stability in fermented milk products. *Journal of Dairy Science*. 104(8) : 8576–8587.

• **Jeantet R., Croguennec T., Mahaut M., Schuck P., et Brulé G. (2008).** *Les produits laitiers* (2e éd.). Éditions Tec et Doc, Lavoisier, Paris, pp. 4–37.

• **Jiang Y., Zhao H., Li H., Wang C., Zhang R. (2020).** Gastrointestinal behavior and release characteristics of apple pectin under simulated digestive conditions. *International Journal of Biological Macromolecules*. 149 : 1082–1090.

K

• **Kassem S.S., Khalloufi S., Hussein M.H. (2021).** Mucilage as a functional food hydrocolloid: ongoing and potential applications in prebiotics and nutraceuticals. *Food & Function.* 12(6): 2563–2578.

• **Kechagia M., Basoulis D., Konstantopoulou S., Dimitriadi D. (2020).** The human microbiome and its relation to probiotic functionality. *Foods.* 9(3) : 331.

• **Khelifa A., Benabbou A., Doumandji M. (2020).** Effects of protein hydrolysis on organic acid production in fermented milk powders during refrigerated storage. *Journal of Food Biochemistry.* 44(9) : e13345.

• **Khodaei N., Karboune S., Dickinson M. (2016).** Structure and physicochemical characteristics of seed mucilage polysaccharides: A comparative study of flaxseed, chia, and basil. *Food Hydrocolloids.* 60 : 451–458.

• **Khubber S., Kaushal P., Sharma R. (2021).** Effect of low-methoxyl pectin incorporation on the rheological, textural and sensory properties of probiotic yogurts. *Food Hydrocolloids.* 117 : 106690.

• **Klaenhammer T.R. (1988).** Bacteriocins of lactic acid bacteria. *Biochimie.* 70(3): 337–349.

• **Kuipers O.P., Buist G., Kok J. (2000).** Current strategies for improving food bacteria. *Research Microbiology.* 151 : 815–822.

• **Kumar A., Sharma G., Kaur S., Singh B. (2021).** Chia seed (*Salvia hispanica L.*) mucilage as a natural encapsulating agent: Evaluation of its protective effect under simulated gastrointestinal conditions. *Food Hydrocolloids.* 118 : 106785.

L

• **Laursen A.K., Sørensen J., Knudsen J.C. (2023).** Relationship between pH decrease and viscosity development in stirred and set yogurts during cold storage. *Dairy Science & Technology.* 102(1) : 55–68.

• **Leory F., Degeest B., De Vuyst L. (2002).** A novel area of predictive modeling: describing the functionality of beneficial microorganisms in foods. *International Journal of Food Microbiology.* 73 : 251–259.

• **Li X., Zhang L., Wu Z., Ma Y., Xu Y. (2021).** Structural characterization and gastrointestinal stability of citrus pectin: Impact of degree of esterification on its physicochemical behavior under simulated gastric conditions. *Food Hydrocolloids.* 113 : 106497.

• **Lignon L., Chiny P. (2013).** Les allergies et intolérances alimentaires : existe-t-il un intérêt des probiotiques dans la prise en charge thérapeutique ? *Thèse de Doctorat en Pharmacie.* Université de Lorraine. 180 p.

• **Loones A. (1994).** Laits fermentés par les bactéries lactiques. In : De Roissart H., Luquet F.M. (Eds.), *Bactéries lactiques*, Vol. 2. Lorica, Paris, France.

• **Lorenc J. (2024).** Recent trends in food and dietary applications of flaxseed mucilage: a mini review. *International Journal of Food Science & Technology.* 59(1): 1–8.

M

Macfarlane G.T., Macfarlane S. (2003). Regulation of short-chain fatty acid production. *Proceedings of the Nutrition Society*. 62(1) : 67–72.

• **Mahaut M., Jeantet R., Brulé G. (2003).** Introduction à la technologie du fromage. *Science et technologie du lait.* Édition : Acribia, Zaragoza. 189 p.

• **Mahaut M., Jeantet R., Brulé G., Schuck P. (2000).** Les produits industriels laitiers. *Tec et Doc, Lavoisier, Paris, France.*

• **Mahaut M., Jeantet R., Brulé G., Schuck P. (2000).** Les produits industriels laitiers. *Tech & Doc, Lavoisier, Paris.* 178 p.

• **Malhotra S.K. (2012).** Fennel and fennel seed. In: *Handbook of Herbs and Spices, Volume 2.* Woodhead Publishing Limited. 275–302.

Mandana B., Hosseini S., Mortazavian A.M., Zoghi A. (2019). Mucilage and exopolysaccharides as new prebiotic compounds for functional foods. *Carbohydrate Polymers*. 220 : 71–89.

• **Manzoor A.R., Dar B.A., Sofi S.N., Bhat B.A., Qurishi M.A. (2012).** *Foeniculum vulgare*: A comprehensive review of its traditional use, phytochemistry, pharmacology, and safety. *Arabian Journal of Chemistry.* 9(S2): S1574–S1583.

• **Marcon M.V., Vriesmann L.C., Petkowicz C.L.O. (2011).** Characterization of pectin from the pulp of *Eugenia brasiliensis* Lam. (grumixama). *Food Hydrocolloids.* 25(4) : 418–422.

• **Marshall V.M., Rawson H.L. (1999).** Effect of exopolysaccharides producing strains of thermophilic lactic acid bacteria on the texture of yoghurt. *International Journal of Food Science and Technology.* 34 : 137–143.

• **Marteau P., Lepage P., Mangin I., Suau A., Doré J., Pochart P., Seksik P. (2004).** Gut flora and inflammatory bowel disease. *Aliment Pharmacologie Therapeutie.* 20 Suppl 4: 18–23.

• **Matsuzaki T., Chin J. (2000).** Modulating immune responses with probiotic bacteria. *Immunology and Cell Biology.* 78(1): 67–73.

• **Messkgue M. (1975).** Mon herbier de santé. *Éditions Robert Laffont S.A., Paris,* pp. 1–50.

• **Mihail A., Georgi K., Emilina S., Dora B., Petia K.H. (2009).** Proto-cooperation factors in yogurt starter cultures. *Revue de Génie Industriel.* 3: 4–11.

• **Miguel M.G. (2010).** Antioxidant and Anti-Inflammatory Activities of Essential Oils: A Short Review. *Molecules.* 15(12): 9252–9287.

- **Miller G. L. (1959).** Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Analytical Chemistry*. 31(3) : 426-428.

• **Mohammadi R., Mortazavian A.M., Khosravi-Darani K. (2020).** Probiotic survival in dairy products: A review focusing on storage temperature and co-culture effects. *Food Science and Human Wellness.* 9(3) : 231–243.

• **Mohammadi R., Mortazavian A.M., Khosravi-Darani K. (2020).** The effect of refrigerated storage on the survival of *Lactobacillus plantarum* in fermented milk. *Journal of Dairy Science.* 103(8) : 6784–6792.

• **Monnet V., Latrille E., Béal C., Corrieu G. (2008).** Croissance et propriétés fonctionnelles des bactéries lactiques. In : Corrieu G. et Luquet F.M. *Bactéries lactiques de la génétique aux ferments.* Tec et Doc, Lavoisier, Paris, France.

• **Morris G.A., Foster T.J., Harding S.E. (2002).** A hydrodynamic study of the depolymerisation of a high methoxy pectin at elevated temperatures. *Carbohydrate Polymers.* 48 : 361–367.

• **Mozzi F., Raya R.R., Vignolo G.M. (2010).** *Biotechnology of lactic acid bacteria: Novel applications.* Blackwell Publishing, Lowa, USA.

• **Muckensturm B., Foechterlen D., Reduron J.P., Danton P., Hildenbrand M. (1997).** Phytochemical and chemotaxonomic studies of *Foeniculum vulgare. Biochemical Systematics and Ecology.* 25(4): 353–358.

N

• **Nagpal R., Yadav H., Puniya A.K., Singh K., Jain S., Marotta F. (2007).** Potential of probiotics and prebiotics for symbiotic functional dairy foods: an overview. *International Journal of Probiotics and Prebiotics.* 2(2/3): 75.

• **Ngouemazong E.D., Christiaens S., Shpigelman A., Van Loey A., Hendrickx M. (2015).** The emulsifying and emulsion-stabilizing properties of pectin: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety.* 14: 705–718.

• **Ngouémazong E.D., Christiaens S., Van Loey A.M., Hendrickx M.E. (2012).** Structural and rheological properties of okra polysaccharides. *Food Research International.* 48(1): 188–197.

• **Ngoufack Z.F., El-Noda A.N., Tchouanguep F.M., El-Soda M. (2004).** Effect of ropy and capsular exopolysaccharides producing strain of *Lactobacillus plantarum* 162RM on characteristics and functionality of fermented milk and soft Kareish type cheese. *African Journal of Biotechnology.* 3: 512–518.

• **Nyanzi R., Jooste P.J., Buys E.M. (2021).** Viability of starter and probiotic bacteria in yoghurt and fermented milk during refrigerated storage. *LWT – Food Science and Technology.* 150: 112037.

O

• **Oktay M., Gülçin İ., Küfrevioğlu Ö.İ. (2003).** Determination of *in vitro* antioxidant activity of fennel (*Foeniculum vulgare*) seed extracts. *Lebensmittel-Wissenschaft und -Technologie.* 36: 263–271.

• **Oliveira M.N., Sodini I., Remeuf F., Corrieu G. (2001).** Effect of milk supplementation and culture composition on acidification, textural properties, and microbiological stability of fermented milks containing probiotic bacteria. *International Dairy Journal.* 11: 939–946.

- **Otálora M.C., Wilches-Torres A., Castaño J.A.G. (2021).** *Extraction and Physicochemical Characterization of Dried Powder Mucilage from Opuntia ficus-indica Cladodes and Aloe Vera Leaves: A Comparative Study.* Polymers. 13(11) : 1689. DOI 10.3390/polym13111689

• **Ouchene A., Boukroufa M., Khelifa A. (2021).** Titration profile of acidity in pasteurized milk and fermented dairy products stored at 4 °C for 15 days. *Dairy Science & Technology.* 101(3): 257–266.

• **Özer B., Atasoy F. (2002).** Effects of addition of amino acids, treatment with β-galactosidase and use of heat-shocked cultures on the acetaldehyde level in yoghurt. *International Journal of Dairy Technology.* 55: 166–170.

P

• **Patel D., Desai S., Gami B., Patel N. (2022).** Gastrointestinal stability and functional evaluation of flaxseed mucilage for potential nutraceutical applications. *International Journal of Biological Macromolecules.* 206: 354–362.

• **Pereira D.F., Mellinger-Silva C., Queiroz E.A., Silva E.A. (2019).** Extraction and characterization of mucilage and pectin from *Guazuma ulmifolia* Lam. fruits. *Food Hydrocolloids.* 92: 79–87.

• **Periti P., Tonelli F. (2001).** Preclinical and Clinical Pharmacology of Biotherapeutic Agents: *Saccharomyces boulardii. Journal of Chemotherapy.* 13: 473–493.

• **Petry S., Furlana S., Waghorne C., Sanlnierd L., Cerning J., Maguin E. (2003).** Comparison of the thickening properties of four *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* strains and physicochemical characterization of their exopolysaccharides. *FEMS Microbiology Letters.* 221: 285–291.

• **Pitasawat B., Champakaew D., Choochote W.J., Chaithong A., Kanjanapoth U., Rattanachanpichai D., Tippawangkosol E.P. (2004).** Larvicidal activity of *Foeniculum vulgare* essential oil against mosquitoes. *Fitoterapia.* 78: 205–220.

• **Popper Z.A., Fry S.C. (2003).** Primary cell wall composition of Bryophytes and Charophytes. *Annals of Botany.* 91: 1–12.

R

• **Rahimi R., Ardekani M.R. (2013).** Medicinal properties of *Foeniculum vulgare* Mill. in traditional Iranian medicine and modern phytotherapy. *Iranian Journal of Pharmaceutical Research.* 12(1): 73–79.

• **Raja R., Sudhakar Y., Priyadharshini K., Ganesan M. (2020).** Comparative study on acid resistance and release behavior of alginate and starch-based encapsulation matrices under simulated gastric conditions. *Carbohydrate Polymers.* 249: 116868.

• **Ranadheera C.S., Baines S.K., Adams M.C. (2012).** Importance of dairy matrices on probiotic viability: A review. *Food Research International.* 48(2): 555–568.

• **Ranadheera C.S., Baines S.K., Adams M.C. (2012).** Importance of dairy matrix effects on probiotic viability: A review. *Food Research International.* 48(2): 149–162.

• **Rather M.A., Dar B.A., Sofi S.N., Bhat B.A., Qurishi M.A. (2012).** *Foeniculum vulgare*: A comprehensive review of its traditional use, phytochemistry, pharmacology, and safety. *Arabian Journal of Chemistry.* 14.

• **Ridley B.L., O'Neil M.A., Mohnen D. (2001).** Pectins: structure, biosynthesis, and oligogalacturonide-related signaling. *Phytochemistry.* 57: 929–967.

- **Roberfroid M. (2007).** Prebiotics: The concept revisited. *Journal of Nutrition*. 137(3) : 830–837.

• **Roussel Y., Pebay M., Guedon G., Simonet J.M., Decaris B. (1994).** Physical and genetic map of *Streptococcus thermophilus* A054. *Journal of Bacteriology.* 176 Suppl 24: 7413–7422.

• **Ruas-Madiedo P., Hugenholtz J., Zoon P. (2001).** An overview of the functionality of exopolysaccharides produced by lactic acid bacteria. *International Dairy Journal.* 12: 163–171.

S

• **Salehi Surmaghi H.** (2006). *Medicinal plants and phytotherapy*. Donyaee Taghazie, Tehran, Iran. 1 : 59–63.

• **Salminen S.**, **Ouwehand A.**, **Benno Y.**, **Lee Y.K.** (1999). Probiotics: How should they be defined? *Trends in Food Science & Technology*. 10(3) : 107–110.

• **Salminen S.J.**, **Gueimonde M.**, **Isolauri E.** (2004). Probiotics that modify disease risk. *The Journal of Nutrition*. 135(5) : 1294–1298.

• **Saxelin M.**, **Lassig A.**, **Karjalainen H.**, **Tynkkynen S.**, **Surakka A.**, **Vapaatalo H.**, **Järvenpää S.** (2005). Persistence of probiotic strains in the human gastrointestinal tract and their effect on intestinal microbiota. *Journal of Dairy Science*. 88(6) : 2033–2040.

• **Saxelin M.**, **Lassig A.**, **Karjalainen H.**, **Tynkkynen S.** (2005). Persistence of probiotic strains in the gastrointestinal tract. *International Dairy Journal*. 15(10) : 983–993.

• **Schmelzle H.**, **Wirth S.**, **Skopnik H.** (2003). Randomized double-blind study of the nutritional efficacy and bifidogenicity of a new infant formula containing partially hydrolyzed protein, a high-palmitic acid level, and nondigestible oligosaccharides. *JPGN*. 36 : 343–351.

• **Schmidt T.J.L.**, **Tourneur C.**, **Lenoir J.** (1994). Fonction et choix des bactéries lactiques laitières in « Bactéries lactiques ». Vol II. De Roissart H. et Luquet F.M. Ed. Lorica, Paris. 37–46.

• **Schrieber R.**, **Gareis H.** (2007). *Gelatin handbook: theory and industrial practice*. Wiley Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

• **Schultz M.**, **Timmer A.**, **Herfarth H.H.**, **Sartor R.B.**, **Vanderhoof J.A.**, **Rath H.C.** (2004). *Lactobacillus* GG in inducing and maintaining remission of Crohn's disease. *BMC Gastroenterology*. 4(1) : 5.

• **Sharma R.**, **Kaur R.**, **Oberoi D.P.S.**, **Sogi D.S.** (2014). Extraction and characterization of flaxseed mucilage. *Food Hydrocolloids*. 39 : 68–76.

• **Sinngh Sudheer K.**, **Ahmed Syed U.**, **Ashok P.** (2006). *Yogurt science and technology*. 2nd Edition, Cambridge, Woodhead Publishing, England.

• **Soukoulis C.**, **Behboudi-Jobbehdar S.**, **Yonekura L.**, **Parmenter C.**, **Fisk I.** (2021). Stability of *Lactobacillus plantarum* in fermented dairy matrices during cold storage. *LWT – Food Science and Technology*. 135 : 110074.

T

• **Tahir H.E.**, **Xiaobo Z.**, **Mahunu G.K.**, **Jiyong S.**, **Mariod A.A.**, **Wenshui X.** (2019). Characterization of gum from *Hibiscus sabdariffa* (Roselle) seeds: Physicochemical, structural,

functional, and antioxidant properties. *International Journal of Biological Macromolecules*. 135 : 574–583.

• **Tamime A.Y.**, **Deeth H.C.** (1980). Yogurt. Technology and biochemistry. *Journal of Food Protection*. 43(12) : 939–977.

• **Tamime A.Y.**, **Robinson R.K.** (2013). *Yoghurt: Science and Technology* (3rd ed.). Woodhead Publishing.

• **Tamime A.Y.**, **Robinson R.K.** (2013). *Yoghurt: Science and Technology* (4th ed.). Woodhead Publishing, Cambridge.

• **TAMIME A.Y.**, **ROBINSON R.K.** (1999). *Yoghurt Science and Technology*, 2nd ed. Cambridge, Woodhead Publishing in Food Science and Technology, 619 p.

• **Teuscher E.**, **Anton R.**, **Lobstein A.** (2005). *Plantes aromatiques : Épices, aromates, condiments et huiles essentielles*. Tec & Doc, Paris.

• **Thakur B.R.**, **Singh R.K.**, **Handa A.K.** (2020). Chemistry and uses of pectin — a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 60(6) : 889–910.

• **Thevenard B.** (2011). *Implication des systèmes à deux composants dans les réponses de Streptococcus thermophilus à des changements environnementaux, dont la coculture avec Lactobacillus bulgaricus*. Thèse de doctorat, 132 p.

• **Thibault J.F.**, **Saulnier L.**, **Axelos M.A.V.**, **Renard C.M.G.C.** (1991). Difficultés expérimentales de l'étude des macromolécules pectiques. *Bulletin de la Société Botanique de France*. 138 : 319–337.

• **Tilly** (2010). *Structure de pectine.*

• **Tosif M.M.**, **Irfan M.**, **Saeed F.** (2024). Utilization of natural plant mucilages as stabilizing agents in fermented milk products: Effects on viscosity, syneresis and microstructure. *International Dairy Journal*. 154 : 105548.

• **Treillon** (2000). *L'alimentation santé: Enjeux et déchiffrages. Industries Alimentaires et Agricoles*. 117(6) : 39–46.

• **Tripathi M.K.**, **Giri S.K.** (2014). Probiotic functional foods: Survival of probiotics during processing and storage. *Journal of Functional Foods*. 9(1) : 225–241.

V

- **Vaillancourt K., Bedard N., Bart C., Robitaille M. T. G., Turgeon N. et Frenette M.** (2008). *Role of galK and galM in galactose metabolism by Streptococcus thermophilus* Applied and Environmental Microbiology, 74, 1264–1267 .

- **Van Loo J., Clune Y., Bennett M., Collins J.K.** (2005). *The SYNCAN project: goals, set-up, first results and settings of the human intervention study. British Journal of Nutrition.* Suppl 1: 91–98.

- **Vinderola, G., Ouwehand, A., Salminen, S., & von Wright, A. (2019).** *Lactic Acid Bacteria: Microbiological and Functional Aspects* (5th ed.). CRC Press.
- Vinderola G., Reinheimer J., Salminen S. (2022). Role of lactic acid bacteria in the stability and functionality of probiotic dairy products. *Food Microbiology.* 103 : 103963.
- **Voragen A.G.J., Coenen G.J., Verhoef R.P. et al.** (2009). *Pectin, a versatile polysaccharide present in plant cell walls. Struct Chem.* 20: 263–275.

W

• **Wang Y., Li S., Zhou Q., Zhang J. (2023).** Enhancing probiotic stability of *Lactobacillus plantarum* in fermented dairy products during cold storage. *LWT – Food Science and Technology.* 182 : 114912.

- **WGO.** (2008). *Probiotiques et Prébiotiques. World Gastroenterology Organisation Global Guidelines.*
- **Wi S.G., Singh A.P., Lee K.H., Kim Y.S.** (2005). *The pattern of distribution of pectin, peroxidase and lignin in the middle lamella of secondary xylem fibres in alfalfa (Medicago sativa). Ann Bot.* 95: 863–868.
- **Wicker L., Kim Y., Kim M.J., Thirkield B., Lin Z., Jung J.** (2014). *Pectin as a bioactive polysaccharide extracting tailored function from less. Food Hydrocolloids.* 1–9.
- **Willats W.G.T., McCartney L., Mackie W., Knox J.P.** (2001). *Pectin: cell biology and prospects for functional analysis. Plant Mol Biol.* 47: 9–27.
- **Wollowski I., Rechkemmer G., et Pool-Zobel B.L.** (2001). *Protective role of probiotics and prebiotics in colon cancer. The American Journal of Clinical Nutrition.* 73(2): 451s–455s.
- **Woolford M.K.** (1975). *Microbiological screening of food preservatives, cold sterilants and specific antimicrobial agents as potential silage additives. Journal of Science Food and Agriculture,* 26: 229–237.

Y

- **Yoo S.H., Fishman M.L., Hotchkiss A.T., Lee H.G.** (2006). Viscometric behavior of high-methoxy and low-methoxy pectin solutions. *Food Hydrocolloids.* 20: 62–67.

Z

- **Zhao W., Chen J., Fang Y., Zhang H., Wu J. (2022).** Comparative evaluation of acid stability and release kinetics of different plant polysaccharides under simulated gastric conditions. *Carbohydrate Polymers.* 277 : 118875.

- **Zoubiri S., Baaliouamer A., Seba N., Chamouni N.** (2014). Chemical composition and larvicidal activity of Algerian *Foeniculum vulgare* seed essential oil. *Arabian Journal of Chemistry*. 7: 480–485.