

République Algérienne Démocratique et Populaire

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie - El Harrach-Alger

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة - الحراش - الجزائر

Département de Technologie Alimentaire et de Nutrition Humaine

Thèse de doctorat

En vue de l'obtention du diplôme de Docteur en Sciences Agronomiques
Option : Sciences Alimentaires

Thème

*Formulation et caractérisation d'un yaourt
supplémenté de la poudre de graines de lin*

Présenté par : M^{me} MIHOUBI eps. DJEHA Mehdi

Soutenue le : 24-07-2019

Jury:

| | | |
|---------------|-------------------------------|--|
| Président : | M ^r BELLAL M. | Professeur(E.N.S.A. El Harrach) |
| Promoteur : | M ^{me} AMELLAL H. | Professeur (UMBB) |
| Co-promoteur: | M ^r MEKIMENE L. | Professeur (E.N.S.A. El Harrach) |
| Examineurs : | M ^r RIBA A. | Professeur (UMBB) |
| | M ^{me} OUCHEMOUKH N. | Maitre de Conférence (Université de Bejaia). |

Dédicaces

Au nom d'Allah clèmon miséricordieux

Je dédie ce modeste travail :

A ma très chère mère ;

A mon cher mari ;

A mon adorable frère ;

A mes anges : Ziad et Sohaib ;

A mes oncles : Boualem, Mohamed et Yoycef

A toute ma famille et mes amis

A tous ceux que j'aime.

Remerciements

Les travaux de ma thèse ont été réalisés au sein du laboratoire de Technologie Alimentaire de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique, El Harrach, du laboratoire des Technologies douces, Valorisation, Physico-chimie des Matériaux Biologiques et biodiversité de l'Université M'Hamed Bougara- Boumerdés et des laboratoires du Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyses Physicochimiques CRAPC de Bou-Ismaïl.

Je remercie tout d'abord Dieu miséricordieux qui m'a donné la possibilité d'entreprendre cette étude et la force et le courage de l'achever.

*Au terme de ce modeste travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à **Mme AMELLAL née CHIBANE Hayet**, professeur, à l'Université M'Hamed Bougara- Boumerdés, Faculté des Sciences, d'avoir accepté de m'encadrer, ainsi que pour le temps qu'elle m'a consacré. Ses qualités humaines et scientifiques, sa compréhension et sa passion pour la recherche m'ont permis de mener à bien ce travail de thèse.*

*Je tiens à remercier vivement **Mr BELLAL M.**, professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de la soutenance.*

*Mes profonds remerciements à **Mr MEKIMENE L.**, professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie, d'avoir accepté de me co-encadrer, à **Mr RIBA A.**, professeur, à l'Université M'Hamed Bougara-Boumerdés, Faculté des Sciences et à **Mme OUCHEMOUKH N.**, maître de conférence A, à l'Université de Bejaïa qui m'ont honoré en acceptant d'examiner ce travail.*

*Je remercie du fond du cœur **Mme HALLADJ F.**, maître de conférence à l'Université M'Hamed Bougara-Boumerdés, pour son aide précieuse, et son orientation lors de la réalisation de ce travail.*

J'adresse mes sincères remerciements aux ingénieurs et techniciens des laboratoires pour leur aide et leur gentillesse au quotidien.

Mes derniers remerciements, de loin les plus intenses, s'adressent à mes plus proches : mon mari, ma mère et mon frère ainsi que toute ma famille pour leur patience et leur soutien constant dans les moments difficiles.

Introduction.....1

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I : La graine de lin

| | | | | | | |
|---------|---|------------|-----|---------|---------|----------------------|
| I.1 | Description | générale | et | culture | du | lin.....5 |
| I.1.1 | | Définition | | | et | classification.....5 |
| I.1.2 | Description botanique.....5 | | | | | |
| I.1.3 | Culture.....6 | | | | | |
| I.2 | | La | | graine | de | lin.....7 |
| I.2.1 | Morphologie et microstructure de la graine de lin.....7 | | | | | |
| I.3 | Production mondiales des graines de lin.....9 | | | | | |
| I.4 | Utilisations des graines de lin.....9 | | | | | |
| I.4.1 | Alimentation humaine.....9 | | | | | |
| I.4.2 | Aliments fonctionnels.....10 | | | | | |
| I.4.3 | Alimentation animale.....12 | | | | | |
| I.5 | Les composés nutritionnels des graines de lin.....12 | | | | | |
| I.5.1 | l'huile de lin.....12 | | | | | |
| I.5.2 | Les protéines du lin.....14 | | | | | |
| I.5.3 | Les composés glucidiques.....15 | | | | | |
| I.5.4 | Les composés phénoliques.....15 | | | | | |
| I.5.5 | Les minéraux et les vitamines.....15 | | | | | |
| I.5.6 | Fibres alimentaires (mucilage ou gomme).....16 | | | | | |
| I.6 | Graines | de | lin | comme | aliment | fonctionnel.....16 |
| I.6.1 | Acide alpha-linolénique.....17 | | | | | |
| I.6.1.1 | Ratio d'acides gras oméga-6 à oméga-3.....17 | | | | | |
| I.6.1.2 | Avantages pour la santé.....18 | | | | | |
| I.6.2 | Les lignanes.....19 | | | | | |
| I.6.2.1 | Avantages pour la santé.....20 | | | | | |

| | |
|---|----|
| I.6.3 Les fibres alimentaires..... | 21 |
| I.6.3.1 Avantages pour la santé..... | 21 |
| I.7 Les anti-nutriments des graines de lin..... | 22 |

Chapitre II : Le yaourt

| | |
|---|---------|
| II.1 | |
| Historique..... |24 |
| II.2 Définition et réglementation..... | 25 |
| II.3 Matières premières utilisées pour la fabrication du yaourt..... | 27 |
| II.3.1 Le lait..... | 27 |
| II.3.1.1 Problématique du lait en Algérie..... | 27 |
| II.3.2 Bactéries caractéristiques du yaourt..... | 29 |
| a. <i>Streptococcus thermophilus</i> | 29 |
| b. <i>Lactobacillus bulgaricus</i> | 30 |
| II.3.2.1 Intérêt et fonctions des bactéries du yaourt..... | 30 |
| II.3.2.1.1 Production d'acide lactique..... | 30 |
| II.3.2.1.2 Activité protéolytique..... | 30 |
| II.3.2.1.3 Activité aromatique..... | 31 |
| II.3.2.1.4 Activité texturante..... | 31 |
| II.3.2.2 Comportement associatif des deux souches..... | 32 |
| II.3.2.3 Facteur influençant la proto-coopération des deux souches..... | 32 |
| II.3.2.4. Principaux facteurs influençant le métabolisme des bactéries lactiques..... | 34 |
| II.3.2.4.1. Facteurs physiques..... | 34 |
| II.3.2.4.2 Facteurs chimiques..... | 34 |
| II.3.2.4.3. Facteurs microbiologiques..... | 35 |
| II.3.2.5. Grandes étapes de la fabrication des yaourts..... | 35 |
| II.3.2.5.1. Standardisation du mélange..... | 35 |
| II.3.2.5.2. Homogénéisation..... | 37 |

Table des matières

| | |
|--|----|
| II.3.2.5.3. Le traitement thermique..... | 37 |
| II.3.2.5.4. Fermentation lactique..... | 38 |
| II.3.2.5.5. Conditionnement et stockage..... | 38 |
| II.4 Structure et comportement rhéologique des yaourts..... | 39 |
| II.4.1 Structure des yaourts | 39 |
| a) Gélification acide..... | 39 |
| II.4.2 Comportement rhéologique..... | 41 |
| a) Propriétés rhéologiques des yaourts..... | 41 |
| b) Méthodes de caractérisation..... | 42 |
| II.5 Caractéristiques nutritionnelles du | |
| yaourt..... | 43 |
| II.6 Les variétés de | |
| yaourt..... | 45 |
| II.6.1 Classification selon la composition chimique du produit..... | 45 |
| II.6.2 Classification selon la saveur du produit..... | 45 |
| II.6.3 Classification selon les produits connexes au yaourt..... | 46 |
| II.6.4 Classification selon les types de yaourt..... | 48 |
| II.7 Les bienfaits du | |
| yaourt..... | 49 |

PARTIE EXPERIMENTALE

Chapitre III : Matériel et méthodes

| | |
|---|----|
| III.1 Matières biologiques..... | 51 |
| III.1.1 Les graines de lin..... | 51 |
| III.1.2 Laits en poudres..... | 51 |
| III.1.3 Les ferments lactiques..... | 51 |
| III.2 Caractérisation physicochimique de la poudre de graines de lin (PGL)..... | 51 |
| III.2.1 Observations colorimétrique et microscopique de la PGL..... | 51 |
| III.2.1.1 Colorimétrie..... | 51 |
| III.2.1.2 Etude de la microstructure par le MEB..... | 52 |

Table des matières

| | |
|--|----|
| III.2.2 Répartition granulométrique | 53 |
| III.2.3 Analyse par diffraction des rayons X (DRX)..... | 56 |
| III.2.4 Analyse des éléments minéraux par la fluorescence du rayon X (FRX)..... | 57 |
| III.2.5 Analyse thermogravimétrique (ATG)..... | 57 |
| III.2.6 Teneur en eau et en matières volatiles (AFNOR T 03 903, 1966)..... | 58 |
| III.2.7 Détermination du pH (NF V 05-108, 1970)..... | 58 |
| III.2.8 Détermination de l'acidité titrable (NF V 05-101,1974)..... | 59 |
| III.2.9 Détermination de la teneur en lipides totaux (NF EN ISO 734-1)..... | 60 |
| III.2.10 Détermination de la teneur en protéines (Méthode dekjeldhal) | 61 |
| III.2.11 Détermination de la teneur en sucres totaux (Méthode de phénol : Dubois)..... | 62 |
| III.2.12 Détermination de la teneur en cendres (NF V05-113, 1972) | 62 |
| III.2.13 Détermination de la teneur en éléments minéraux | 63 |
| III.2.14 Détermination de la teneur en polyphénols totaux..... | 63 |
| III.2.14.1 extraction des polyphénols..... | 63 |
| III.2.14.2 Dosage des polyphénols totaux (PPT)..... | 64 |
| III.2.15 Test de piégeage du radical libre DPPH•..... | 65 |
| III.3 Préparation du yaourt avec la PGL..... | 66 |
| III.4 Caractérisation physico-chimique structurale et organoleptique des yaourts..... | 68 |
| III.4.1 Détermination du pH..... | 68 |
| III.4.2 La détermination de l'acidité titrable..... | 68 |
| III.4.3 Dosage de la matière grasse (AFNOR, 1985)..... | 69 |
| III.4.5 La synérèse..... | 69 |
| III.4.6 Analyse sensorielle..... | 69 |
| III.4.7 Analyse microbiologique..... | 70 |
| III.4.7.1 Cinétique de croissance des ferments lactiques..... | 70 |
| III.4.7.2 Qualité hygiénique du yaourt..... | 71 |
| III.4.8 Etude de la microstructure des yaourts..... | 71 |
| III.4.9 L'analyse de la texture et de l'aspect rhéologique..... | 72 |

| | |
|--|----|
| III.4.9.1 L'analyse de la texture..... | 72 |
| III.4.9.2 L'analyse rhéologique..... | 73 |
| III.4.10 Analyse statistique..... | 76 |

Chapitre VI : Résultats et discussion

| | |
|---|-----|
| VI.1 Caractérisation physico-chimique de la poudre de graines de lin (PGL)..... | 77 |
| VI.1.1 Propriétés biochimiques..... | 77 |
| VI.1.1.1 Activité antioxydante de la PGL..... | 80 |
| VI.1.1.2 Teneur en minéraux..... | 82 |
| VI.1.2 Etude de la couleur..... | 82 |
| VI.1.3 Etude de la microstructure par le MEB | 82 |
| VI.1.4 Répartition granulométrique..... | 83 |
| VI.1.5 Analyse par diffraction des rayons X (DRX)..... | 84 |
| VI.1.6 Analyse des éléments minéraux par la fluorescence du rayon X (FRX)..... | 84 |
| VI.1.7 Analyse thermogravimétrique (ATG)..... | 85 |
| VI.2 Caractérisation physico-chimique, structurale et organoleptique des yaourts..... | 87 |
| VI.2.1 Propriétés biochimiques..... | 87 |
| VI.2.1.1 Teneur en minéraux..... | 88 |
| VI.2.2 Évolution de l'acidification du yaourt pendant la fermentation..... | 90 |
| VI.2.3 Evolution de l'acidification du yaourt au cours du stockage réfrigéré | 92 |
| VI.2.4 Analyse sensorielle..... | 94 |
| VI.2.5 Analyse microbiologique..... | 95 |
| VI.2.5.1 Cinétique des ferments lactiques..... | 95 |
| VI.2.5.2 Qualité hygiénique des yaourts..... | 97 |
| VI.2.6 Microstructure des yaourts..... | 98 |
| VI.2.7 Synérèse..... | 100 |
| VI.2.9 Texture des yaourts..... | 102 |
| VI.2.10 Comportement rhéologique..... | 104 |
| <i>Conclusion</i> | 115 |

Table des matières

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau I : Production en tonnes de graines de lin. | 11 |
| Tableau II : composition nutritionnelle des graines de lin..... | 13 |
| Tableau III : Composition en acides gras de l'huile de lin..... | 14 |
| Tableau IV : Répartition en acides gras de différents types de lin..... | 14 |
| Tableau V : Profils d'acides gras de diverses graines oléagineuses..... | 18 |
| Tableau VI :composition typique du lait de vache..... | 28 |
| Tableau VII : Causes possibles d'homogénéisation inadéquate d'un mélange et incidences sur la qualité du yaourt..... | 37 |
| Tableau VIII :Teneur moyenne des différentes variétés de yaourt pour 100g de produit..... | 47 |
| Tableau IX :recettes des yaourts aux graines de lin..... | 68 |
| Tableau X : germes recherchés dans les yaourts..... | 71 |
| Tableau XI : La composition biochimique de la poudre de graines de lin..... | 77 |
| Tableau XII : Paramètres de la couleur de la poudre de Graines de lin..... | 82 |
| Tableau XIII : Caractéristiques granulométrique de la PGL..... | 83 |
| Tableau XIV : Eléments minéraux présents dans la PGL déterminés par la fluorescence du rayon X(FRX)..... | 85 |
| Tableau XV : La composition biochimique des yaourts..... | 88 |
| Tableau XVI : Teneur moyenne en éléments minéraux dans la PGL et les yaourts en mg/100g..... | 89 |
| Tableau XVII : Variation de l'acidité titrable (°D) pendant la durée de fermentation du yaourt entier(Y1) et du yaourt allégé (Y2) supplémentés de PGL et le yaourt témoin..... | 92 |
| Tableau XVIII : Effet de la supplémentation du yaourt avec la PGL sur le pH et l'acidité titrable (°D) pendant 28 jours de stockage à 4 ° C..... | 93 |
| Tableau XIX : Effet de la supplémentation du yaourt avec la PGL sur la viabilité des ferments lactiques (UFC /ml) pendant la fermentation..... | 95 |

Liste des tableaux

| | |
|--|-----|
| Tableau XX : Qualité hygiénique des yaourts..... | 97 |
| Tableau XXI: Paramètres de pénétration desyaourtsadditionnés de PGL..... | 102 |
| Tableau XXII : Les paramètres rhéologiques du modèle d' Herschel-Bulkley..... | 107 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure n°1: Morphologie de <i>linum usitatissimum</i> L..... | 5 |
| Figure n°2 : Culture du lin en champs (photo 1) et évolution du plant de lin en serre, du bouton de fleur à la capsule mature (photos 2 à 5)..... | 6 |
| Figure n°3 : Photos de graines de lin dorées et brunes. | 8 |
| Figure n°4 : Représentation schématique de la graine de lin (A) : section longitudinale de la graine, (B, C) : assises cellulaires (en coupe transversale D, en coupe longitudinale E) * : pourcentages massiques des fractions..... | 9 |
| Figure n°5 : Les utilisations du lin textile et du lin oléagineux. | 10 |
| Figure n°6: bactéries lactiques du yaourt : A (<i>Lb. Bulgaricus</i>), B (<i>St. Thermophilus</i>). | 29 |
| Figure n°7 : Schéma illustrant les interactions de <i>Streptococcus thermophilus</i> et <i>Lactobacillus bulgaricus</i> en culture mixte dans le lait..... | 33 |
| Figure n° 8: Diagramme de fabrication des yaourts..... | 36 |
| Figure n°9 : Modèle de structure de micelle de caséines. | 40 |
| Figure n°10 : Effet du traitement thermique sur la microstructure du yaourt. | 41 |
| Figure n° 11: Schéma de l'espace chromatique CIE : $L^*a^*b^*$ | 52 |
| Figure n°12 : Schéma d'un MEB. | 53 |
| Figure n° 13: La diffraction de la lumière. | 55 |
| Figure n° 14 : Schéma simplifié de l'unité optique d'un granulomètre laser. | 56 |
| Figure n°15 : Piégeage du radical libre DPPH [•] | 66 |
| Figure n°16: Diagramme de fabrication de yaourt ferme à la PGL..... | 67 |
| Figure n° 17: Photo du texturomètre..... | 73 |

Liste des figures

| | | |
|-----------------------|--|-----|
| Figure n°18: | Schéma des cylindres coaxiaux d'un rhéomètre..... | 74 |
| Figure n° 19: | Rhéomètre AR 2000..... | 75 |
| Figure n°11 : | Micrographies de la PGL déterminée par le MEB..... | 82 |
| Figure n° 12: | Distribution granulométrique de la poudre de graines de lin..... | 83 |
| Figure n°13: | diffraction par rayons X de la PGL..... | 84 |
| Figure n° 14 : | Courbe d'analyse thermogravimétrique (ATG/DSC) de la PGL..... | 86 |
| Figure n°15: | Variation du pH en fonction de la durée de fermentation des yaourts. Les bars avec les différentes lettres dans le même temps de fermentation diffèrent significativement ($p < 0,05$)..... | 91 |
| Figure n°16 : | Propriétés sensorielles des yaourts. (1: produit non standard impropre à la consommation à 5: produit d'excellente qualité) (T1 à T10: dégustateurs)..... | 94 |
| Figure n°17 : | nombre de <i>Streptococcus thermophilus</i> (A) et <i>Lactobacillus delbrueckii subsp. Bulgaricus</i> (B) dans les yaourts pendant le stockage à 4 ° C. Les barres avec des lettres différentes dans le même temps de stockage diffèrent significativement ($p < 0,05$)..... | 97 |
| Figure n°18: | Micrographies déterminées par le MEB des yaourts conservées à 4 ° C pendant 28 jours supplémentés de 3% de PGL (Y1,Y2) et yaourt témoin à 0% PGL..... | 99 |
| Figure n° 19: | Synérèse des yaourts. | 100 |
| Figure n°20: | Modèle proposé par Siebert et al. (1996) pour expliquer la stabilité de la structure du gel des yaourts pour différents rapports de [protéine] et de [polyphénol]..... | 101 |
| Figure n°21: | Profil de pénétrométrie des yaourts..... | 104 |
| Figure n°22 : | Courbes de viscosité des yaourts..... | 106 |

Liste des figures

| | | |
|----------------------|--|-----|
| Figure n°23 : | Courbe d'hystérésis du yaourt Y1..... | 109 |
| Figure n°24 : | Courbe d'hystérésis du yaourt témoin..... | 110 |
| Figure n°25 : | Courbe d'hystérésis du yaourt Y2..... | 110 |
| Figure n°26 : | Variation de G' , G'' et delta du yaourt témoin en fonction des contraintes d'oscillation..... | 112 |
| Figure n°27 : | Variation de G' , G'' et delta du yaourt Y1 en fonction des contraintes d'oscillation..... | 113 |
| Figure n°28 : | Variation de G' , G'' et delta du yaourt Y2 en fonction des contraintes d'oscillation..... | 113 |
| Figure n°29 : | Yaourts formulés..... | 114 |

Liste des abréviations

ALA : acide alpha linoléique ;

AAO : activité antioxydante ;

AGPI : acide gras polyinsaturé ;

AG : acide gras ;

A.J: avant Jésus christ ;

AL : acide linoléique ;

Cholestérol LDL : Low Density Lipoprotein, ou lipoprotéines de faible densité ;

Cholestérol HDL : High Density Lipoprotein, ou lipoprotéines de haute densité ;

CIE : Commission Internationale de l'Eclairage ;

DHA : acide docosahexaénoïque ;

EFSA : autorité européenne de sécurité des aliments ;

EPA : acide eicosapentaénoïque ;

EPS: exopolysaccharide ;

FIL: Fédération Internationale Laitière ;

GL : graine de lin ;

HMGA : acide 3-hydroxy-3-méthylglutarique ;

HMF : hydroxy-méthylfurfural ;

Lb: Lactobacillus ;

MGLA: matière grasse laitière anhydre ;

UHT: ultra haute température ;

MG : matière grasse ;

MEB : microscope électronique à balayage ;

ME : microscope électronique ;

Liste des abréviations

PGL: poudre de grains de lin ;

PP : polyphénols ;

SDG : diglycoside de secoisolariciresinol ;

SECO : Secoisolariciresinol ;

St: Streptococcus ;

TAG : triacylglycérols (triglycérides) ;

TNF- α : facteur de nécrose tumorale ;

USDA: United States Department of Agriculture.

Introduction

Au cours des dernières années, des médecins du monde entier ont constaté la dégradation de la santé de la population mondiale, la réduction de l'espérance de vie, la diminution de la capacité de travail et la résistance de l'organisme à l'infection. La solution la plus indiquée à ce problème est un régime alimentaire sain, équilibré physiologiquement et biologiquement.

A souligner qu'à travers, la sensibilisation des consommateurs et les informations disponibles sur les modes de vie sains ont accru la demande d'aliments présentant des avantages nutritionnels spécifiques, tels que les aliments fonctionnels.

Il y'a lieu de révéler que, la dynamique actuelle du marché des produits laitiers, y compris le yaourt, oblige les industriels à formuler constamment de nouvelles recettes. Ces formulations doivent répondre aux exigences des consommateurs qui s'attendent à des produits naturels à faible teneur en sucre, faible teneur en gras et sans conservateurs tout en respectant la sensation dans la bouche et l'arôme, ce qui détermine largement l'acceptabilité du produit **(Paci Kora, 2004)**.

Le yaourt est un produit laitier frais fermenté produit par coagulation acide du lait par l'action de micro-organismes tels que *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus* et *Streptococcus thermophiles* **(Fiorda et al., 2016)**, avec la contribution d'autres bactéries lactiques, qui présentent des avantages gastro-intestinaux très intéressants contre plusieurs pathologies tels que l'intolérance au lactose, la constipation, les maladies diarrhéiques, le cancer du côlon, les maladies inflammatoires intestinales et les infections liées à *Helicobacter pylori* **(Bernat et al., 2014)**. L'allégation de la santé a autorisé la consommation de yaourt pour améliorer la digestion du lactose chez les personnes souffrant d'intolérance au lactose **(EFSA, 2010)**. Il présente un profil nutritionnel et probiotique élevé, ainsi qu'une forte fréquence de consommation, ce qui a incité les chercheurs à renforcer le yaourt avec différents types de composants bénéfiques pour la santé **(Baba et al., 2018 ; Nakasaki et al., 2008 ; JuNoh et al., 2013)**.

Les probiotiques, un groupe d'aliments fonctionnels, sont définis comme des microorganismes vivants qui, consommés en quantité suffisante, offrent des avantages pour la santé de l'hôte **(Hill et al., 2014)**. Dans la plupart des pays, le yaourt, plus que d'autres produits laitiers, est le produit le plus connu qui contient des probiotiques **(Hasani et al., 2016 ; Aryana et Olson, 2017)** puisque c'est des bactéries de ce type qui servent généralement à la production du yaourt (*Lactobacillus bulgaricus* et *Streptococcus thermophilus*). Pour bénéficier de tous les avantages des produits probiotiques pour la santé liés aux

microorganismes vivants qu'ils contiennent, ces microorganismes doivent être consommés à un niveau allant de 10^8 - 10^{10} UFC par jour (Minelli et Benini, 2008). Le nombre minimal de bactéries probiotiques vivantes qu'il est recommandé d'inclure dans les produits alimentaires au moment de la consommation varie de 6 à 8 log UFC / g (Michael et al., 2015).

La viabilité des probiotiques contenus dans le yaourt est affectée par divers facteurs tel que, les conditions de stockage, la concentration en acide lactique du produit, le type et la concentration des cultures de départ utilisées et les concentrations de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) et d'oxygène dans le yaourt (Karimiet al., 2011 ; Hasani et al., 2016).

En conséquence, le maintien de ces bactéries probiotiques viables à un niveau élevé dans le yaourt pendant leur stockage et jusqu'à leur date de péremption n'est pas une tâche simple (Ferdousi et al., 2013).

Plusieurs stratégies visant à améliorer la viabilité des bactéries probiotiques dans le yaourt constituent un sujet de recherche important (Karimi et al., 2011). L'ajout de substances prébiotiques dans le yaourt peut influencer sur la viabilité des probiotiques et augmenter leur vitalité pendant le stockage à froid.

Au cours des dernières années, plusieurs ingrédients alimentaires, tels que les fibres alimentaires (Staffolo et al., 2004), l'huile d'onagre (Lee et al., 2006), β glucan (Gee et al., 2007 ; Sahan et al., 2008), la poudre de dattes (Amellal, 2008) la nanopoudre de chitosane (Seo et al., 2009), les thés verts et noirs (Jaziri, et al., 2009), la farine de lentille (Zare et al., 2011), Phycocyanine (Mohammadi-Gouraji et al., 2018), microparticules lipidiques solides chargées de bêta-carotène (Molina et al., 2018), la poudre de thé vert (Chang Heet et al., 2018)...etc. ont été inclus dans des formulations des yaourts pour améliorer leurs valeurs nutritionnelle et organoleptique ainsi que leurs propriétés physicochimiques et texturales .

Le lin (*Linum usitatissimum*) appartenant à la famille des Lineaceae, est une plante herbacée annuelle avec des fleurs bleues, qui produisent de petites graines plates allant du jaune doré au rouge ou au brun. La graine de lin a une texture croquante et une saveur de noisette (Morris, 2007 ; Rubilar et al., 2010).

C'est l'une des cultures commerciales les plus anciennes, les premières traces de son utilisation datent de 8000 ans av. J.-C. en Turquie (Van Zeiste, 1972). Son nom latin *Linum usitatissimum* «lin plus utile», renvoie à ses multiples utilisations. Actuellement, le lin est utilisé dans les domaines de l'industrie textile (fibre), de l'alimentation (graine et huile) et de la chimie (huile) (Vaisey-Genser et Morris, 2003).

À l'heure actuelle, la graine de lin a de nouvelles perspectives en tant que nourriture fonctionnelle, en raison de son excellent profil nutritionnel et de ses avantages potentiels pour la santé, il est devenu un ingrédient attrayant dans les régimes spécialement conçus pour des effets bénéfiques précis pour la santé (**Oomah, 2001**).

La graine de lin contient des protéines, des fibres alimentaires, des polysaccharides, des composés polyphénoliques et des acides gras essentiels pour la santé qui aident à prévenir certaines maladies. Sa composition en acide alpha-linoléique (ALA), des acides gras oméga-3 essentiels, des fibres alimentaires et des lignanes a un intérêt particulier pour les consommateurs, les fabricants d'aliments et les chercheurs (**Vaisey-Genser et Morris, 2003**).

Cette graine est unique parmi les graines oléagineuses en raison de sa teneur élevée en acide gras ALA oméga-3. Elle contient entre 35% et 45% d'huile, l'ALA représente environ 50% à 60% d'acides gras (**Wiesenborn et al. 2002**), c'est l'un des acides gras polyinsaturés essentiels, il présente des propriétés anti-inflammatoires, anti-thrombotiques et anti-arythmiques (**Simopoulos, 1999**). La graine de lin contient également de l'acide linoléique (LA), un acide gras essentiel oméga-6. L'huile de lin contient trois fois plus d'acides gras oméga-3 que les acides gras oméga-6. La triple insaturation de l'acide alpha-linoléique (C18:3, 50 à 60%) donne à l'huile de lin une forte réactivité concernant l'oxygène et donc une haute capacité de séchage. Cette propriété est intéressante pour les applications oléochimiques (**Knorr, 1995**).

La graine de lin est constituée d'environ 28% de fibres alimentaires, qui comprennent 60% à 80% de fibres insolubles et 20% à 40% de fibres solubles (mucilage) (**Bhatty, 1995**).

Pendant les dix dernières années, les chercheurs ont porté une attention particulière et croissante aux polyphénols, à leur grande abondance dans notre alimentation et à leur rôle probable dans la prévention de diverses maladies associées au stress oxydatif, telles que le cancer ainsi que les maladies cardiovasculaires et neurodégénératives. De toutes les graines et les céréales, la graine de lin est celle qui a le plus haut contenu en lignane (**Meagher et Beecher, 2000**), ce composé lorsqu'il est ingéré par des humains influe sur une large gamme de systèmes biologiques qui les maintiennent en bonne santé (**Muir, 2010**).

La popularité croissante de la graine de lin est due à ses effets bénéfiques pour la santé, y compris la réduction des maladies cardiovasculaires et le risque de cancer, en particulier le cancer du sein et le cancer de la prostate, les activités anti-inflammatoires, l'effet laxatif et la réduction des symptômes de la ménopause et de l'ostéoporose (**Goyal et al., 2014**).

La supplémentation en huile de graines de lin pendant environ quatre semaines a permis de protéger les souris contre l'infection par *Streptococcus pneumoniae* (Saini, 2010). La graine de lin et son huile réduisent la croissance des tumeurs au stade ultérieur de la carcinogénèse alors que le précurseur de lignane chez les mammifères exerce le plus grand effet inhibiteur sur la croissance de nouvelles tumeurs (Thompson et al., 1996).

Cette graine possède des propriétés antioxydantes et hépatoprotectrices. Plusieurs études ont préconisé des repas supplémentés de graines de lin pour l'abaissement du taux de cholestérol (Cunnane et al., 1993 ; Ridges et al., 2001 ; Bhathena et al., 2003). Une étude sur des rats hypercholestérolémiques nourris avec un régime de chutney de graines de lin (15%) ont révélé une réduction significative du cholestérol LDL et du cholestérol sérique total et aucun changement dans le cholestérol HDL. Chez les rats intoxiqués au CCl₄, les produits de peroxydation lipidique ont été neutralisés par des lignanes de lin (Shakir et Madhusudan, 2007).

Pour toutes ses vertus pour la santé, des scientifiques et des nutritionnistes, voir même des médecins, ont prêté attention à cet ingrédient alimentaire miraculeux. Son introduction dans l'alimentation peut constituer une solution à pas mal de problèmes de santé.

Dans ce contexte, le présent travail a pour but d'incorporer les graines de lin sous forme de poudre à un produit laitier de très grande consommation et qui touche toute catégorie d'âge, le « yaourt ».

Il n'y a aucune étude dans la littérature sur la production de yaourt ferme aux graines de lin. Par conséquent, les objectifs de cette étude étaient de caractériser la poudre de graine de lin (PGL) et de formuler un yaourt ferme enrichi de cette poudre pour créer un produit probiotique, fonctionnel possédant les attributs nutritionnels, physicochimiques, texturaux et sensoriels souhaitables.

Cette thèse est présentée en trois parties :

 une partie bibliographique portant sur les différents aspects abordés dans cette thèse, à savoir, des généralités sur la graine de lin : sa culture, ses utilisations et ses composés nutritionnels, et le yaourt : sa composition, les étapes de fabrication ainsi que sa classification ;

 une description du matériel et des méthodes utilisés ;

 une partie résultats et discussion, concernant la caractérisation physicochimique et microscopique de la PGL et des trois formulations de yaourts élaborés, l'analyse sensorielle (test de dégustation) et l'analyse microbiologique des yaourts. L'impact de l'enrichissement

avec cette poudre sur le comportement textural et rhéologique des yaourts a été discuté également dans cette partie.

Chapitre I : Graines de lin

I.1 Description générale et culture du lin

I.1.1 Définition et classification

Le lin est une plante annuelle herbacée faisant partie de la famille des Linacées. Cette famille présente 200 espèces de lin dont la plus connue, la plus cultivée et la plus répandue est *Linum usitatissimum* (Beard et Comstock 1980).

C'est une plante dressée, dont les ramifications s'élèvent en forme de corymbe au-dessus de la tige. Elle appartient au sous-embranchement des Angiospermes, et fait partie de l'ordre des Linales, de la famille des Linaceae. (Fernald, 1950 ; Tutin et al., 1972).

I.1.2 Description botanique

Linum usitatissimum a une courte racine pivotante émettant des racinelles fibreuses pouvant atteindre 90 à 120 cm en sol léger. Les feuilles sont en vert grisâtre, simples, sessiles, linéaires-lancéolées, entières, portées sur la tige et ses ramifications. L'inflorescence est une cyme ou grappe terminale lâche.



Figure n°1: Morphologie de *linum usitatissimum* L.

Les fleurs sont bleu clair ou blanc, hermaphrodites et hypogynes, elles ont un pédoncule dressé et allongé, 5 sépales, 5 pétales, 5 étamines et un pistil formé de 5 carpelles séparés par autant de fausses cloisons. Le fruit, une capsule à cinq loges, contient un maximum de 10 graines.

I.1.3 Culture

La culture du lin est l'une des plus anciennes cultures utilitaires, les premières traces de son utilisation datant de 8000 avant J.C. en Turquie (**Van Zeiste, 1972**).

Les sols qui conviennent le mieux à la culture du lin sont les sols lourds à loam, qui retiennent bien l'humidité. À cause de son système racinaire peu développé, le lin ne pousse pas bien dans les sols sableux où l'eau est un facteur limitant. La plante tolère bien la salinité, à condition que les éléments nutritifs soient en quantité suffisante et que l'humidité ne manque pas au moment de la germination. Un bon désherbage est essentiel, car le lin est un mauvais compétiteur.

Le lin peut être cultivé en rotation avec les céréales, dont le maïs, mais non après une culture de pomme de terre ou de betterave sucrière (à cause des maladies de racine) ni après une autre culture de lin. On recommande d'attendre trois ans entre les cultures de lin, afin d'éviter la flétrissure fusarienne (**Daun, 1993**).



Figure n°2 : Culture du lin en champs (photo 1) et évolution du plant de lin en serre, du bouton de fleur à la capsule mature (photos 2 à 5)

On cultive deux types de *L. usitatissimum* : le lin oléagineux, dont la graine produit une huile, une plante relativement courte à ramifications secondaires nombreuses, et le lin textile, plus élevé et moins ramifiée, dont la tige produit des fibres (**Tutin et al., 1972**). Les variétés commerciales de lin oléagineux sont différenciées en variétés de printemps et d'hiver, pour une production végétale adaptée aux conditions climatiques (29 variétés de lin de printemps contre 9 variétés de lin d'hiver sont inscrites au catalogue français de 2012 (**Geves, 2012**)).

Les lignées d'hiver sont issues du croisement de lignées de printemps puis sélectionnées pour leur tolérance aux basses températures. Le lin d'hiver est semé en septembre et le lin de printemps en mars. Le lin d'hiver, présente un rendement en graine plus stable, car la variété est plus tolérante au froid et moins sensible aux stress environnementaux.

L'évolution du plant de lin du bouton de fleur jusqu'à la capsule mature est présentée figure n°2 (photos 2 à 5). La période végétative, permettant la croissance des tiges et des feuilles (photo 1), s'étend de 45 à 60 jours. Durant les 15 à 25 jours suivants, les boutons floraux apparaissent à l'extrémité des tiges (photos 2 et 3). Les fleurs évoluent en capsules durant la maturation (photo 4), qui se déroule sur les 30 à 40 jours suivants. Au terme de la maturation, la plante est sèche et jaunie, les capsules contenant les graines sont récoltées. Chaque capsule compte 5 loges, contenant au maximum 10 graines (**Labalette et al., 2011**).

I.2 La graine de lin

Les graines de lin font partie des premières plantes cultivées de façon domestique. Cependant, cela ne fait que quatre cents ans que le lin est apparu en Amérique du Nord lorsque des immigrants européens ont en apporté en Nouvelle-France, lors de la colonisation (**Muir et Westcott, 2003**). Les graines de lin sont donc utilisées par l'être humain depuis des milliers d'années et ont des utilisations très variées. Ces graines possèdent aussi plusieurs composantes nutritionnelles intéressantes.

La graine de lin est l'organe de reproduction de la plante. La conservation des graines à l'état de dormance est permise par la teneur réduite des graines en eau (inférieure à 10%). C'est une graine exalbuminée, c'est-à-dire que ses réserves (lipides et protéines) sont situées dans l'amande (formée par deux cotylédons enveloppant l'embryon) (**Labalette et al., 2011**).

I.2.1 Morphologie et microstructure de la graine de lin

La graine de lin a une forme ovale, aplatie et lisse. Elle présente un bec plus ou moins recourbé à son extrémité (Figure n°4, A). Le tégument de la graine prend des couleurs variant du jaune au marron (Figure n°3). Les dimensions des graines commerciales sont variables : de

3,0 à 6,4 mm de longueur, 1,8 à 3,4 mm de largeur et 0,6 à 1,5 mm d'épaisseur en moyenne (**Freeman, 1995**). Le poids de mille grains varie entre 5 et 10 g (**Labalette et al., 2011**). La variabilité de ce poids est relative à la date et à la densité de semis, et rend compte de la bonne formation et alimentation des graines (**FAO, 2012**).

Cette graine possède une microstructure caractéristique (C, D et E, figure n°4), chaque tissu ayant une fonction physiologique propre. L'amande est protégée contre les pathogènes et les contraintes mécaniques par le tégument. Celle-ci est composée du spermoderme et de l'épiderme.



Figure n°3 : Photos de graines de lin dorées et brunes

Différentes assises cellulaires composent le tégument (en partant de l'intérieur vers l'extérieur, (**Kadivar, 2001**) (figure n°4, D et E.) :

- une couche de pigments, contenant les tanins responsables de la couleur de la graine (du jaune au marron) (endosperme) ;
- deux assises cellulaires de fibres (longitudinales et transverses) (spermoderme) ;
- une couche de cellules rondes (spermoderme) ;
- une assise mucilagineuse, contenant le mucilage est située sur la couche la plus externe de la graine de lin (épiderme).

L'amande de la graine est composée de l'embryon, de deux cotylédons plats et de l'endosperme (figure n°4, B et C). Dans l'amande sont contenues les macromolécules de réserves (de 10 à 30% de protéines, de 35 à 45% de lipides et 28% de glucides (**Daun et al., 2003**). Au cours de la germination, ces composés seront dégradés pour permettre la croissance de l'embryon et le développement de la future plante.

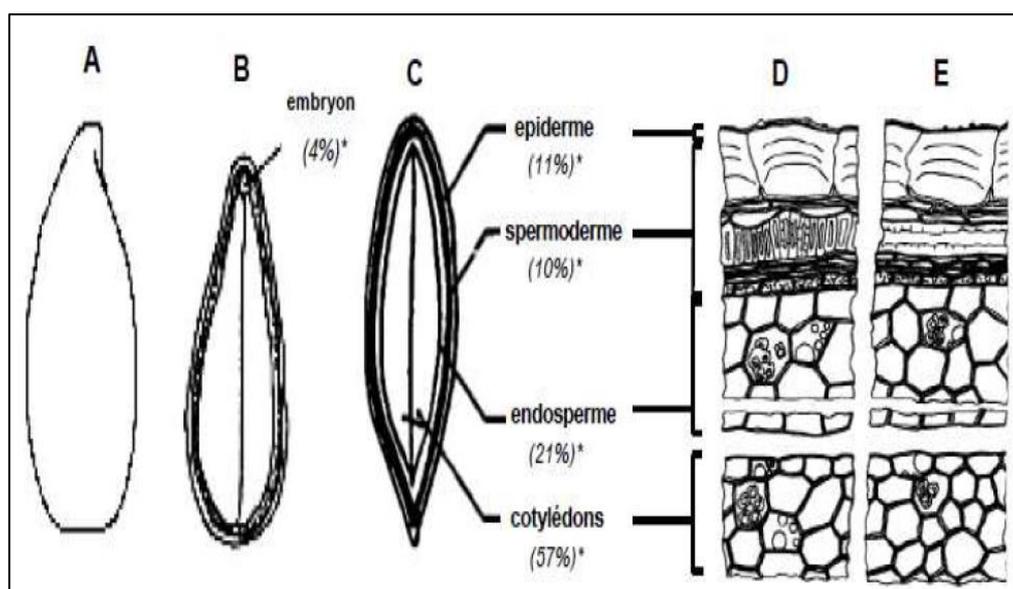


Figure n°4 : Représentation schématique de la graine de lin (A) : section longitudinale de la graine, (B, C) : assises cellulaires (en coupe transversale D, en coupe longitudinale E) (Daun et al., 2003; Peterson, 1958), * : pourcentages massiques des fractions (Oomah, 2003)

I.3 Production mondiales des graines de lin

Du point de vue de la production mondiale, le Canada est le principal producteur et exportateur de graines de lin. La production est assez variable (entre 720 000 tonnes et 930 000 tonnes ces dernières années), et exportée pour l'essentiel (Tableau n°1) (FAO, 2015).

I.4 Utilisations des graines de lin

I.4.1 Alimentation humaine

Depuis l'an 1000 avant l'ère commune, les graines de lin ont été consommées dans les plats à base de céréales par plusieurs civilisations. Encore aujourd'hui, dans les marchés nord-américains, les graines de lin, sous différentes formes peuvent être retrouvées : graines de lin entières, l'huile de lin et mêmes des aliments ayant des graines de lin volontairement rajoutées. Concernant l'huile contenue dans les graines de lin, cette dernière est utilisée depuis plusieurs milliers d'années mais c'est dans la première moitié du vingtième siècle que l'huile de lin est devenue une source d'huile comestible en Europe et en Amérique du Nord (Muir et Westcott, 2003).

La figure n°5 présente les différentes utilisations du lin textile et du lin oléagineux.

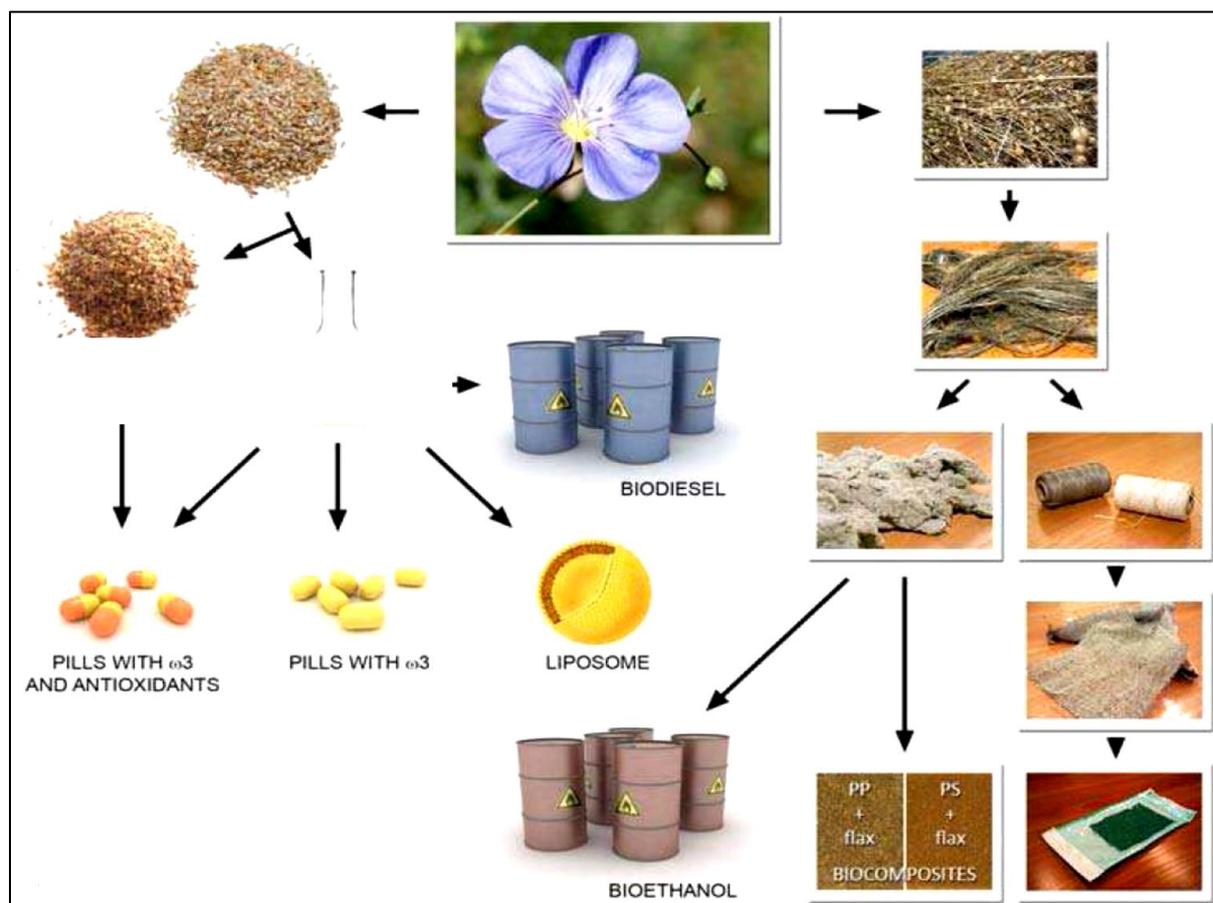


Figure n°5 : Les utilisations du lin textile et du lin oléagineux (Czemplik *et al.*, 2011)

I.4.2 Aliments fonctionnels

L'effet médicinal des graines de lin est connu depuis de très nombreuses années. En effet, autour de 500 ans avant l'Ère commune, Hippocrate a exprimé que les graines de lin permettaient de soulager les douleurs abdominales.

Au premier siècle, Tacitus a évoqué les vertus des graines de lin et au huitième siècle, Charlemagne, convaincu de leur importance, a mis sur pied des lois afin d'exiger leur consommation (Flax council of Canada, 2015; Goyal *et al.*, 2014).

La graine de lin a fait l'objet d'un intérêt croissant pour les nutritionnistes et les chercheurs médicaux en raison de ses avantages potentiels pour la santé associés à ses composants biologiquement actifs : L'acide α -linoléique (ALA), lignanes Diglycoside de Secoisolariciresinol (SDG) et fibre diététique (Touré et Xueming, 2010).

La nourriture fonctionnelle peut être définie comme la nourriture ou les ingrédients alimentaires qui peuvent fournir des avantages physiologiques et aident à prévenir et / ou à guérir des maladies (Al-Okbi, 2005).

Tableau I : Production en tonnes de graines de lin. **FAOSTAT (FAO, 2015)**

| Pays | Production (tonnes) | Production (%) |
|------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| Canada | 423 000 | 22,0 % |
| Chine | 350 000 | 18,2 % |
| États-Unis d'Amérique | 230 030 | 12,0 % |
| Fédération de Russie | 178 210 | 9,3 % |
| Éthiopie | 150 000 | 7,8 % |
| Inde | 146 000 | 7,6 % |
| Kazakhstan | 94 610 | 4,9 % |
| Royaume-Uni | 72 000 | 3,7 % |
| Argentine | 52 075 | 2,7 % |
| Ukraine | 46 800 | 2,4 % |
| France | 35 000 | 1,8 % |
| Suède | 23 900 | 1,2 % |
| Autres pays | 220 753 | 6,3 % |
| Total | 1 922 759 | 100% |

Actuellement, les graines de lin ont de nouvelles perspectives en tant que nourriture fonctionnelle, car en raison de l'intérêt croissant des consommateurs pour une nourriture avec de superbes vertus pour la santé et pour leur excellent profil nutritionnel et de leurs avantages potentiels pour la santé, ces graines sont devenues un ingrédient attrayant dans les régimes

spécialement conçus pour des bienfaits spécifiques pour la santé (**Oomah, 2001**). Malgré les multiples preuves cliniques sur les graines de lin, les gens ne sont toujours pas au courant de leurs composants nutritionnels et thérapeutiques.

I.4.3 Alimentation animale

C'est en alimentation animale que la graine de lin cuite a été la plus utilisée. De façon empirique, les graines étaient mélangées à l'alimentation des animaux quand l'herbe venait à manquer ou à certaines périodes critiques de la vie de l'animal (notamment autour de la mise bas). Jusqu'à nos jours, cet usage s'est perpétué pour la production de viandes de qualité et dans la nourriture des chevaux (**Weill et Mairesse, 2010**).

Le potentiel laitier des vaches a été accru ces dernières années, et la couverture des besoins énergétiques surtout au début de lactation, devient de plus en plus problématique. Typiquement un supplément lipidique est ajouté à la ration pour augmenter sa densité énergétique. Néanmoins, l'ajout de matières grasses à la ration peut avoir d'autres avantages, comme l'amélioration des performances de reproduction et de la résistance à la chaleur. Parallèlement, les connaissances relatives à l'impact des acides gras (AG) sur la santé humaine ont considérablement évolué, ce qui renforce l'intérêt de l'utilisation des lipides dans la ration des vaches laitières, non seulement comme source importante d'énergie, mais aussi comme l'un des principaux moyens de modulation de la composition en AG du lait (**Akraim, 2005**).

I.5 Les composés nutritionnels des graines de lin

La composition chimique des graines de lin (Tableau II) dépend de l'environnement de croissance, de la génétique et des conditions de transformation (**Morris 2007**).

I.5.1 l'huile de lin

Les graines de lin contiennent de 35 à 45% d'huile, ce qui permet de classer le lin dans la catégorie des oléagineux. Une partie de l'huile se trouve dans la cuticule (10%). Cependant la majorité de l'huile est localisée au niveau des cellules des cotylédons (78%) et de l'endosperme (12%) sous forme de globules lipidiques ou oléosomes (de diamètre moyen 1,3µm).

Les oléosomes contiennent des lipides neutres (triglycérides, de 96 à 98%), des lipides polaires (phospholipides et glycolipides, de 1 à 1,6%) et des oléosines (1,3%), (**Daun et al.,**

2003; Oomah, 2003). La répartition des acides gras de l'huile de lin est précisée dans le tableau III.

Tableau II : composition physicochimique des graines de lin (Payne, 2000 ; Gopalan et al. 2007 ; Morris 2007)

| Nutriments | Montant pour 100g de graines de lin comestibles |
|--------------------------|---|
| Humidité (g) | 6,5 |
| Protéines (N×6.25) (g) | 20,3 |
| Lipides (g) | 37,1 |
| Minéraux (g) | 2,4 |
| Fibres brutes (g) | 4,8 |
| Fibres diététiques (g) | 24,5 |
| Glucides (g) | 28,9 |
| Energie (Kcal) | 530,0 |
| Potassium (mg) | 75,0 |
| Calcium (mg) | 170,0 |
| Phosphore (mg) | 370,0 |
| Fer (mg) | 2,7 |
| Vitamine A (µg) | 30,0 |
| Vitamine E (mg) | 0,6 |
| Thiamine (B1) (mg) | 0,23 |
| Riboflavine (B2) (mg) | 0,07 |
| Niacine (mg) | 1,0 |
| Pyridoxine (mg) | 0,61 |
| Acide pantothénique (mg) | 0,57 |
| Biotine (µg) | 0,6 |
| Acide folique (µg) | 112 |

Les variations de la teneur en acide α -linoléinique sont principalement dues au génotype du lin, ainsi qu'à ses conditions de culture (Daun et al., 2003). Certaines études ont montré que les lins cultivés à basse température contenaient une huile à plus haut degré d'insaturation (Canvin, 1965; Dybing et Zimmerman, 1965). Ces observations ont également été confirmées en comparant les profils en acides gras des lins de printemps et d'hiver ; un écart

de 4% supérieur en acide α -linoléique a été identifié pour les variétés d'hiver (Labalette et al., 2011).

Les semenciers canadiens ont développé par mutations génétiques et croisements, des variétés de lin à faible taux d'acide α -linoléique ; les variétés Solin. Depuis, d'autres sélections génétiques ont conduit au développement de variétés dont l'huile contient différentes proportions d'acide α -linoléique (Tableau IV).

Tableau III : Composition en acides gras de l'huile de lin (Oomah et al., 1997 ; Daun et al., 2003).

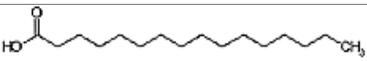
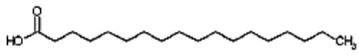
| Nom commun de l'acide gras | Nomenclature biochimique | Formule semi-développée | Répartition (%) |
|----------------------------|--------------------------|--|-----------------|
| Acide palmitique | C16:0 |  | 4-6 |
| Acide stéarique | C18:0 |  | 2-3 |
| Acide oléique | C18:1 ω 9 |  | 10-22 |
| Acide linoléique | C18:2 ω 6 |  | 12-18 |
| Acide α -linoléique | C18:3 ω 3 |  | 50-62 |

Tableau IV : Répartition en acides gras de différents types de lin (Daun et al., 2003)

| Echantillon | C16 :0 | C18 :0 | C18 :1 | C18 :2 | C 18 :3 |
|--|--------|--------|--------|--------|---------|
| | (%) | | | | |
| Lin | 4,8 | 3,6 | 21,0 | 22,8 | 57,4 |
| Lin hautement saturé | 27,8 | 2,8 | 11,3 | 6,6 | 44,0 |
| Solin | 5,6 | 3,4 | 15,4 | 71,9 | 2,2 |
| Lin à haute teneur en acide oléique | 15,3 | 4,0 | 49,3 | 21,6 | 9,3 |
| Lin à haute teneur en acide α -linoléique | 4,5 | 2,3 | 10,0 | 10,7 | 71,8 |

I.5.2 Les protéines du lin

Le taux de protéines varie entre 10,5 et 31% dans les graines de lin (**Oomah et Mazza, 1993**). Ces variations sont tributaires du génotype, cependant les conditions pédoclimatiques ont également un impact sur l'accumulation des protéines. Ainsi, de 2000 à 2001, une variation de 2% de teneur en protéines a été relevée sur la variété n°1 Canadian Western (**Hall et al., 2006**). Les protéines du lin se répartissent majoritairement dans les cotylédons (76%) et dans l'endosperme (16%) (**Oomah, 2003**). Les deux principales protéines identifiées sont des protéines de stockage : l'albumine et la globuline. La proportion d'albumine dans la graine varie entre 26 et 41% du total des protéines, cette proportion dépendant des variétés de lin (**Hall et al., 2006**).

I.5.3 Les composés glucidiques

Deux types de composés glucidiques sont identifiés dans la graine mature : l'amidon, présent en faible quantité (de 1 à 2%) et le mucilage (de 3,4 à 9,4%) (**Oomah et al., 1995 ; Daun et al., 2003**). Le mucilage est un polysaccharide hétérogène, composé d'oses neutres et acides. Les oses majoritaires identifiés dans le mucilage sont, le D-xylose (19-38%), l'acide D glucuronique (21-36%), le L-galactose (12-16%) et le L-rhamnose (11-16%). Les oses minoritaires sont le L-arabinose (8-13%), le L-fucose (3,9%) et le D-glucose (4-6%). Cependant la composition du mucilage dépend des variétés de lin et des conditions de culture (**Oomah et al., 1995**).

I.5.4 Les composés phénoliques

Les graines de lin contiennent une bonne quantité de composés phénoliques. Ces derniers sont bien connus pour les propriétés anti-cancer et anti-oxydantes. Fondamentalement, les graines de lin ont trois différents types de composés phénoliques : les acides phénoliques, les flavonoïdes et les lignanes. Les principaux acides phénoliques présents dans les graines délipidées sont l'acide férulique (10,9 mg / g), l'acide chlorogénique (7,5 mg / g) et l'acide gallique (2,8 mg / g). D'autres acides phénoliques incluent glucosides d'acide p coumarique, glucosides d'acide hydroxycinnamique et l'acide 4-hydroxybenzoïque sont présents à des faibles quantités (**Beejmohun et al., 2007, Mazza 2008**). Les flavones C et les flavones O-glycosides sont les principaux flavonoïdes dans les graines de lin (**Mazza 2008**).

I.5.5 Les minéraux et les vitamines

Les graines de lin constituent une bonne source de minéraux en particulier, le phosphore (650 mg / 100 g), le magnésium (350-431 mg / 100 g), le calcium (236-250 mg / 100 g) et très peu de sodium (27 mg / 100 g) (**Morris 2007**).

Ces graines contiennent de petites quantités de vitamines liposolubles et hydrosolubles. La vitamine E est présente sous forme de γ -tocophérol, s'élevant à 39,5 mg / 100 g. Ce dernier est un antioxydant offrant une protection aux protéines cellulaires et aux graisses contre l'oxydation; il favorise l'excrétion de sodium dans l'urine, ce qui peut aider à abaisser la tension artérielle et les risques de maladies cardiaques et la maladie d'Alzheimer (**Morris et al., 2005; Morris, 2007**).

I.5.6 Fibres alimentaires (mucilage ou gomme)

Le terme fibre alimentaire est un mot commun utilisé pour décrire une variété de substances végétales qui ne sont pas facilement digérées par les enzymes responsables de la digestion chez l'homme (**Eastwood et Passmore, 1983**).

Les graines de lin sont constituées de 22% à 26%, soit deux fois le pourcentage de fibres des haricots. Une demi-once de graines de lin entières sèches fournit entre 20% et 25% de vos besoins quotidiens en fibres. Ces graines contiennent des fibres alimentaires solubles et des fibres alimentaires insolubles dans une proportion qui varie entre 20:80 et 40:60.

La fraction majeure des fibres insolubles est constituée de cellulose et lignine et la fraction de fibres solubles est constitué de gommages et de mucilage (**Qian, 2012 ; Cui et al., 1996**).

Les fibres solubles forment un gel lorsqu'elles sont mélangées avec de l'eau. Ce gel ralentit la vidange de l'estomac, réduisant potentiellement les niveaux de glucose dans le sang. Le cholestérol est également abaissé car il est entouré par le gel, qui inhibe son absorption et conduit à son excrétion. Le mucilage des graines de lin associé à leur coque est une gomme, un matériau composé de polysaccharides acides et neutres. La fraction neutre de la graine de lin contient du xylose (62,8%) alors que la fraction acide est composée principalement de rhamnose (54,5%) suivi par du galactose (**Cui et al., 1994**).

Des études ont démontré que les fibres ralentissent la libération de sucre dans le sang et contribuent ainsi à la réduction de la glycémie dans une large mesure (**Thakur et al., 2009**).

D'autres études ont montré que la consommation élevée de fibres alimentaires est bénéfique pour la prévention de l'obésité chez les hommes et les femmes (**Du, 2010**).

I.6 Graines de lin comme aliment fonctionnel

La graine de lin est considérée comme une denrée alimentaire fonctionnelle en raison de la présence de trois principaux composants bioactifs : l'acide alpha-linolénique, les lignanes et les fibres alimentaires.

I.6.1 Acide alpha-linolénique

L'acide alpha-linolénique est la principale composante fonctionnelle de la graine de lin. Il sert de source exclusive d'acide gras oméga-3 dans les régimes végétariens (**Riediger et al., 2009**). L'huile de lin est riche en acide gras polyinsaturé (73% des acides gras totaux), modérée en gras monoinsaturés (18%) et faible quantité de graisse saturée (9%) (**Cunnane et al., 1993; Dubois et al., 2007**). Elle est riche en acides gras essentiels, acide alpha-linolénique (ALA) et l'acide linoléique (LA). Ces acides gras sont appelés essentiels parce que les deux sont requis par le corps mais le corps ne peut pas les synthétiser, donc ils doivent être fournis dans le régime alimentaire (**De Lorgeril et al., 2001**).

I.6.1.1 Ratio d'acides gras oméga-6 à oméga-3

Les profils d'acides gras de diverses graines oléagineuses sont présentés dans le tableau V. Il est évident à partir des données que les graines de lin contiennent le taux le plus élevé d'acide linoléique suivie de graines de soja et de moutarde, tandis que les huiles de tournesol et de carthame contiennent une grande quantité d'acide linoléique qui peut conduire à diverses maladies.

Les enzymes qui transforment par étapes successives ALA et LA en médiateurs cellulaires (prostaglandines, thromboxanes, leucotriènes issus des AGPI en CO₂, ou docosanoïdes issus du DHA) ou celles qui incorporent les AGPI aux membranes cellulaires (acyltransférases) peuvent utiliser comme substrat aussi bien les AGPI oméga-3 que les AGPI oméga-6. Ainsi, apparaît une notion de « compétition » entre les deux molécules « indispensables et essentielles » que sont LA oméga-6 et ALA oméga-3.

Cette compétition est d'autant plus importante à souligner que les médiateurs cellulaires issus des oméga-3 ou des oméga-6 qui jouent des rôles le plus souvent antagonistes : ainsi, un régime riche en oméga-6 conduira, par exemple, à la synthèse de médiateurs cellulaires aux rôles pro-inflammatoires, alors qu'à l'inverse, ALA oméga-3 conduira à la synthèse de médiateurs cellulaires anti-inflammatoires.

Ainsi, la régulation de l'inflammation, la composition du cerveau, la fluidité membranaire et les mécanismes de la lipogenèse, sont entièrement dépendants de l'équilibre entre oméga-6 et

oméga-3 dans nos assiettes, c'est-à-dire de choix effectués très en amont dans notre chaîne alimentaire (Ailhaud *et al.*, 2006).

Tableau V : Profils d'acides gras de diverses graines oléagineuses (Dubois *et al.*, 2007)

| Acides gras | Graine de lin | Moutarde | Soja | Son de riz | Maïs | sésame | Carthame | olive | Tournesol |
|-----------------------|---------------|----------|------|------------|------|--------|----------|-------|-----------|
| Saturés | 10 | 8 | 15,7 | 21,3 | 14,8 | 15,7 | 9,1 | 15,3 | 12,8 |
| Mono-insaturés | 18,5 | 62,4 | 24,2 | 42,4 | 28,1 | 40,1 | 13,9 | 73,8 | 22,4 |
| Polyinsaturés | 71,8 | 31,5 | 59,8 | 35,9 | 57,1 | 45,7 | 77,3 | 10 | 66 |
| Acide linoléique (n6) | 16,8 | 21,6 | 52,1 | 34,6 | 56,1 | 45,3 | 76,5 | 9,4 | 65,6 |
| Acide linoléique (n3) | 55 | 9,9 | 7,8 | 1,2 | 1 | 0,4 | 0,8 | 0,6 | 0,5 |
| n6/n3 | 0,3 | 2,2 | 6,7 | 2 | 56 | 113 | 7,4 | 16 | 131 |

Depuis plus de 100 à 150 ans, la consommation d'huiles végétales de maïs, de graines de tournesol, de graines de carthame, de graines de coton et de graines de soja ont fortement augmenté, ce qui a entraîné un déséquilibre drastique dans l'apport en acides gras essentiels. Aujourd'hui, le ratio des acides gras oméga-6 : oméga-3 est déplacé à 20-30: 1 dans les régimes occidentaux et la situation est encore pire dans le cas des régimes indiens avec un ration de 38-50: 1 qui révèle une plus grande quantité d'acides gras oméga-6 incorporés dans la membrane cellulaire (Simpolous 2004, Pella *et al.*, 2003). Par conséquent, les fonctions cellulaires soutiennent plus de processus pro-inflammatoires que les processus anti-inflammatoires.

Des choix alimentaires simples, qui favorisent les aliments contenant des acides gras oméga-3, peuvent réduire ce déséquilibre. Le ratio recommandé acides gras oméga-6 : oméga-3 peut être dans la gamme de 4: 1 à 10: 1, et les apports en acides gras oméga-6 et oméga-3 devraient représenter au moins 3 et 0,5% de l'apport énergétique total, respectivement (Tolkachev et Zhuchenko, 2000 ; De Lorgeril *et al.*, 2001 ; WHO, 2003).

I.6.1.2 Avantages pour la santé

Un grand nombre d'études cliniques ont reconnu l'énorme potentiel des acides gras polyinsaturés n-3 contre les médiateurs inflammatoires comme les prostaglandines E2, les leucotriènes B4, TNF- α , interleukine et cytokines. Ces études cliniques ont révélé que les acides gras polyinsaturés n-3 sont utiles dans la prévention des maladies coronariennes, de l'athérosclérose, de la polyarthrite rhumatoïde et de l'asthme (**Arend et Dayer 1995; Kremer 2000**).

L'apport quotidien de 3 g d'EPA (acide eicosapentaénoïque) et de DHA (acide docosahexaénoïque) qui sont des AG de la famille des oméga3, pour plus de 12 semaines s'est révélé efficace pour réduire l'inflammation de la polyarthrite rhumatoïde (**Kremer, 2000**). Il a également été rapporté que la consommation de compléments alimentaires oméga-3 entraîne une réduction significative des anti-inflammatoires non stéroïdiens (**Arend et Dayer, 1995**).

Une supplémentation en huile de graines de lin (GL) pendant environ 4 semaines a permis de protéger les souris contre l'infection par *Streptococcus pneumonia* (**Saini et al., 2010**).

Thompson et al. (1996) ont rapporté que la graine de lin et son huile réduisent la croissance des tumeurs au stade ultérieur de la cancérogenèse. Le rôle de l'huile de lin dans la prévention des tumeurs est attribué à son acide alpha-linolénique élevé. La composition en acides gras des tumeurs a révélé une grande incorporation de l'acide alpha-linolénique qui à son tour a entraîné la suppression de la croissance des cellules tumorales (**Gabor et Abraham, 1986 ; Gonzalez et al. 1991 ; Thompson 1996**).

La graine de lin possède des propriétés antioxydantes et hépatoprotectrices. Plusieurs études préconisent l'abaissement du cholestérol par la consommation de repas à base de GL (**Cunnane et al., 1993; Cunnane et al., 2001; Bhathena et al.2003**). Une étude sur l'hypercholestérolémie des rats nourris au régime supplémenté de chutney de lin (15%) a révélé une réduction significative du cholestérol LDL (Low Density Lipoprotein) et du cholestérol total sérique et aucun changement dans le cholestérol HDL (High Density Lipoprotein).

Plusieurs études cliniques ont montré que l'EPA et le DHA jouent un rôle majeur dans la réduction des symptômes de la dépression. Pendant la dépression ou le stress, les cytokines pro-inflammatoires telles que le TNF- α , interféron gamma etc. sont produites. L'augmentation du rapport des acides gras n-6 : n-3 peut conduire à la production de cytokines pro-inflammatoires qui provoquent la dépression et les sautes d'humeur chez les personnes âgées (**Maes et al., 1996; Locke et Stoll, 2001 ; Tiemeier et al., 2003**).

I.6.2 Les lignanes

Les lignanes sont des phytoestrogènes, qui sont abondamment disponibles dans les plantes riches en fibres, céréales (blé, orge et avoine), légumineuses (haricot, lentille, soja), légumes (brocoli, ail, asperges, carottes) fruits, baies, thé et boissons alcoolisées. La graine de lin contient environ 75 à 800 fois plus de lignanes que les céréales, les légumineuses et les fruits et légumes (Mazur *et al.*, 2000 ; Meagher et Beecher, 2000 ; Murphy et Hendrich, 2002; Hosseinien et Bêta, 2009).

Le secoisolariciresinol diglycoside (SDG) est le principal lignane de graines de lin, avec des teneurs mineures en matésinol, pinorésinol, laricirésinol et isolaricirésinol (Meagher *et al.*, 1999 ; Sicilia *et al.*, 2003 ; Krajcova *et al.* 2009). La teneur en SDG varie de 11,7 à 24,1 mg / g dans la farine dégraissée de GL et de 6,1 à 13,3 mg / g dans la farine complète de GL (Johnsson *et al.*, 2000).

Les lignanes sont des composés diphenoliques synthétisés par couplage de deux résidus d'alcool coniférylique existants dans la paroi cellulaire des plantes supérieures (Westcott et Muir, 2003 ; Toure et Xueming, 2010). Le secoisolaricirésinol (SECO) est produit par hydrolyse acide du diglycoside secoisolariciresinol, une forme liée existante comme un complexe de cinq résidus de diglycoside secoisolariciresinol maintenus ensemble par quatre résidus de HMGA (acide 3-hydroxy-3-méthylglutarique) dans les couches externes de la graine (Kamal-Eldin *et al.*, 2001 ; Raffaelli *et al.*, 2002 ; Muir, 2006).

I.6.2.1 Avantages pour la santé

Les études épidémiologiques indiquent que les régimes alimentaires riches en phytoestrogènes réduisent le risque de divers cancers hormono-dépendants, de maladies cardiaques et d'ostéoporose (Krajcova *et al.*, 2009 ; Touré et Xueming, 2010). D'autres études démontrent également la capacité de SDG à piéger les radicaux libres hydroxyles prouvant que c'est un antioxydant puissant pour le corps humain qui produit gratuitement des radicaux lors de l'oxydation des graisses, des protéines et des glucides. Les radicaux libres endommagent les tissus, la membrane des lipides et les acides nucléiques, ce qui peut causer le cancer, les maladies pulmonaires, les maladies neurologiques, le vieillissement prématuré et le diabète (Prasad 1997; Toure and Xueming, 2010 ; Singh *et al.* 2011a, b).

SECO et SDG jouent également un rôle important dans la réduction de l'hypercholestérolémie, de l'athérosclérose, de l'hypertension et du diabète (Prasad, 2004). L'administration quotidienne de 100 mg SDG a été trouvée efficace pour la réduction du taux

de cholestérol dans le sang et les risques de maladies hépatiques chez des hommes modérément hypercholestérolémiques (**Fukumitsu et al., 2010**).

Les lignans, l'enterodiol et l'entérolactone seraient en partie responsables de l'inhibition de la croissance du cancer de la prostate chez l'humain (**Westcott et Muir, 2003**). Diverses études cliniques impliquent que les lignanes empêchent le cancer du sein par équilibrage des mécanismes hormonaux. Ils inhibent l'activité de l'aromatase dans le tissu adipeux entraînant la circulation d'oestrogène (**Adlercreutz et al., 1993 ; Sturgeon et al., 2008**).

Chez les femmes ménopausées, les lignanes agissent comme des œstrogènes faibles, tandis qu'aux niveaux normaux d'oestrogène, les lignanes agissent comme des antagonistes d'œstrogène (**Wang et al., 1994 ; Hutchins et Slavin, 2003**). Les graines de lin diététiques réduisent modérément les niveaux sériques des hormones sexuelles stéroïdiennes qui sont impliquées dans le développement du cancer du sein chez les femmes ménopausées obèses (**Sturgeon et al., 2008**).

I.6.3 Les fibres alimentaires

Les graines de lin constituent une bonne source de fibres alimentaires solubles et insolubles. Elles occupent une place unique parmi les graines oléagineuses en raison de la présence de mucilage situé dans les couches externes de la graine (**Singh et al., 2011a,b**). Ce mucilage a pris de l'élan en raison de ses avantages pour la santé et de son superbe potentiel de propriétés fonctionnelles (**Susheelamma, 1987 ; Mazza et Biliaderis, 1989**). Les GL contiennent 35-45% de fibres dont les deux tiers sont insolubles et un tiers est soluble.

I.6.3.1 Avantages pour la santé

La capacité de la fibre insoluble de graines de lin à se lier à l'eau augmente le volume intestinal qui est utile dans le traitement de la constipation, le syndrome du côlon irritable et la maladie diverticulaire.

La fibre soluble du mucilage de graine de lin augmente la viscosité des contenus intestinaux et retarde la vidange gastrique et l'absorption des nutriments. L'introduction de mucilage de graines de lin dans le régime alimentaire des poussins de poulet de chair a entraîné une diminution de la digestibilité fécale des graisses et des graisses acides tandis que la digestion des protéines n'a pas été affectée. La viscosité intestinale des poulets de chair augmente avec l'ajout des mucilages de graines de lin dans l'alimentation (**Rebole et al., 2002**). Traditionnellement, la fibre diététique été utilisée pour le traitement de la constipation et le syndrome de l'intestin irritable (**Cann et al., 1984 ; Tarpila et al., 2005**).

La fibre de lin joue un rôle important dans l'abaissement du niveau de glucose dans le sang. Des études ont démontré que les fibres insolubles ralentissent la libération de sucre dans le sang et aident ainsi à réduire considérablement les taux de glucose dans le sang (**Thakur et al., 2009; Kapoor et al., 2011**).

La gomme soluble de la graine de lin peut être utile dans la prévention des maladies cardiovasculaires en présentant un effet hypocholestérolémiant (**Jenkins et al., 1987 ; Cunnane et al., 1994**). **Kristensen et al. (2010)** ont étudié l'effet de fibres de lin traitées différemment sur l'excrétion de graisse et l'équilibre énergétique. Il a été observé que la boisson enrichie en fibres de lin abaisse le taux de cholestérol dans une large mesure par rapport à la fibre de pain enrichi. Cependant, la consommation de pain de fibres augmente l'excrétion de graisse fécale et maintient l'équilibre en énergie appropriée. Des études ont montré que l'apport élevé en fibres diététiques est bénéfique pour la prévention de l'obésité chez les hommes et les femmes (**Du et al., 2010**).

I.7 Les anti-nutriments des graines de lin

Les graines de lin contiennent des anti-nutriments qui peuvent avoir une influence néfaste sur la santé et le bien-être de la population humaine. Les glycosides cyanogéniques sont les principaux anti-nutriments fractionnés en linustatine (213-352 mg / 100 g), néolinustatine (91-203 mg / 100 g) et la linmarine (32 mg / 100 g). Le contenu de ces trois glycosides dépend du cultivar, de la localisation, etc. (**Oomah et al., 1992**). Le type de fibre de lin a un pourcentage plus élevé des glycosides que le type de graine, et la graine mûre contient moins de glycoside que la graine immature. La graine de lin entière contient 250-550 mg / 100 g de glycoside cyanogénétique (**Singh et al., 2011a, b**).

Dans l'intestin, les glycosides cyanogéniques libèrent le cyanure d'hydrogène, un puissant inhibiteur respiratoire, par la β -glycosidase qui produit des thiocyanates. Les thiocyanates interfèrent avec l'absorption d'iode par la glande thyroïde et l'exposition à long terme aggrave les troubles de la carence en iode, le goitre et le crétinisme. Les glycosides cyanogéniques sont thermolabiles et facilement détruit par des méthodes de traitement, à savoir l'autoclavage, le grillage par micro-ondes, granulation et par certaines enzymes détoxifiantes telles que les β -glycosidases, libérant du cyanure d'hydrogène qui peut être évaporé en utilisant de la vapeur (**Cunnane et al., 1993 ; Feng et al., 2003 ; Yamashita et al., 2007**).

L'acide phytique, un autre anti-nutriments présent dans les graines de lin, sa teneur varie de 23 à 33 g / kg de farine de graines de lin (**Oomah et al., 1996a, b**). L'acide phytique interfère avec l'absorption de calcium, de zinc, de magnésium, de cuivre et de fer.

C'est un fort chélateur, formant des complexes de protéines et d'acide minéral-phytique et réduisant ainsi leur biodisponibilité (**Erdman, 1979 ; Akande et al., 2010**). Des études cliniques révèlent que l'alimentation des rats nourris avec des graines de lin n'a aucun effet sur leur statut en Zn (**Ratnayake et al., 1992**). **Ganorkar et Jain (2013)** ont également rapporté que les anti-nutriments de la graine de lin ont un impact moindre sur la santé humaine par rapport à ceux de soja et de canola.

Linatine (facteur antipyrrodoxidine) a été identifié comme un antagoniste de la vitamine B6 dans le cas des poussins. Chez l'homme, les graines de lin ne sont pas associées avec une carence en vitamine B6 (**Dieken, 1992, Ratnayake et al., 1992**). Les inhibiteurs de la trypsine sont également signalés dans les graines de lin. L'activité est insignifiante comparativement au soja et aux graines de canola (**Bhatty, 1993**).

Chapitre II : Le yaourt

II.1 Historique

Le yaourt est un aliment très ancien. Les premières traces de son invention remontent à l'époque néolithique, entre 10 000 et 5000 av. J.-C. Le yaourt est entré dans l'histoire de l'alimentation humaine comme un produit traditionnel qui permet de conserver le lait et qui a de nombreux effets bénéfiques pour la santé.

Sa découverte fut par accident, au Moyen-Orient, 5000 av. J.-C, les gardiens de troupeaux conservaient le lait dans des sacs en peau de chèvre qu'ils accrochaient sur le dos de leurs chameaux. Après avoir voyagé sous le soleil brûlant, le lait était transformé en une crème piquante. Les sucs intestinaux qui se dégageaient du sac, la chaleur et l'agitation causée par les mouvements du chameau formaient la combinaison idéale pour produire le tout premier yaourt (**Yogurt Council, 2013**).

À cette époque, les hommes avaient déjà compris que le yaourt pouvait servir à conserver le lait grâce à la fermentation lactique, une caractéristique qui allait être associée au yaourt pendant des millénaires. En 2000 av. J.-C., le "yaourt" était déjà utilisé régulièrement comme ingrédient en Inde et en Perse (Iran) (**Batmanglij, 2007**).

Les Grecs ont été les premiers à mentionner son existence. Les plus anciens écrits mentionnant le "yaourt" sont attribués à Pline l'Ancien (100 av. J.-C.), qui avait remarqué que certaines tribus nomades savaient comment "épaissir le lait pour le transformer en une substance à l'acidité agréable" (**Pliny et al., 1856**).

Le terme "yaourt" vient du mot turc "Yogurtmak" qui signifie « épaissir le lait » pour le rendre plus facile à transporter. Les Turcs selon le dictionnaire complet, intitulé Diwan Lughat al-Turk et rédigé par Mahmoud de Kachgar ont été les premiers à mentionner les propriétés médicinales de ce produit (1072) pour soigner un bon nombre de maladies et de symptômes – comme la diarrhée et les coups de soleil –. Ce lait fermenté était également utilisé comme produit de nettoyage et comme lotion de beauté. Son acidité naturelle permettait d'éliminer les cellules mortes de la peau (**Kashgari, Etkisindeki Turk Edebiyati**).

Au rythme des déplacements des tribus, le yaourt se propagea de l'Asie Centrale à l'Inde, les laits fermentés firent une courte apparition, en France, sous François Ier (en 1542). Celui-ci, souffrant de problèmes digestifs, la cour fit appel à un médecin turc. Pour le guérir, il le soumit à une cure de lait de chèvre fermenté. Après avoir consommé ce produit, le roi guérit au bout de quelques semaines. Le médecin repartit à Constantinople emportant avec lui le secret.

Il a fallu attendre le XXe siècle pour que des chercheurs parviennent à expliquer l'origine des bienfaits pour la santé associés à la consommation de yaourt.

En 1905, à l'âge de 27 ans, un étudiant en microbiologie bulgare du nom de Stamen Grigorov a découvert une souche de bacille particulière, responsable de la fermentation du lait – le processus à l'origine du yaourt. Cette souche est aujourd'hui appelée *Lactobacillus bulgaricus* par la communauté scientifique et elle est toujours utilisée dans les cultures de yaourt.

En 1909, le lauréat russe du Prix Nobel, Elie Metchnikoff a élaboré une théorie selon laquelle le vieillissement serait dû à une bactérie toxique présente dans l'intestin, tandis que l'acide lactique pourrait prolonger la durée de vie.

Isaac Carasso a été inspiré par les travaux d'Elie Metchnikoff, qui avait popularisé le lait fermenté comme aliment sain. Comme le yaourt n'était pas encore très connu en Europe occidentale à l'époque, Carasso a d'abord commercialisé ce produit comme un médicament vendu en pharmacie (1919).

Le yaourt est devenu un succès commercial lorsqu'Isaac Carasso a commencé à en produire en combinaison avec des confitures. Il se diffuse alors dans les sociétés occidentales. Les commerçants immigrés grecs et géorgiens ouvrirent alors des restaurants avec à la carte des mets et des spécialités de leur pays d'origine. Le mot « yaourt » entre au dictionnaire en 1925 (**Yogurt et Nutrition, 2015**).

II.2 Définition et réglementation

Le yaourt est le produit laitier coagulé, obtenu par fermentation lactique grâce au développement des seules bactéries lactiques thermophiles spécifiques dites *Lactobacillus bulgaricus* et *Streptococcus thermophilus*, à partir du lait et de produits laitiers. Les bactéries lactiques thermophiles spécifiques doivent êtreensemencées simultanément et se trouvent vivantes

dans le produit fini à raison d'au moins 10 millions de bactéries par gramme rapportées à la partie lactée (**Ministère du commerce, 1998**). Les produits traités thermiquement après fermentation ne s'appellent donc pas yaourt. Les modalités de conservation (durée, température de stockage) sont définies très précisément. Ces produits doivent notamment être maintenus jusqu'à leur consommation à une température comprise entre 0 et 6°C pour que les bactéries lactiques restent vivantes. De plus, la quantité d'acide lactique libre contenue dans 100 g de yaourt ne doit pas être inférieure à 0,7 g (**Syndifrais, 1997**).

Un yaourt (ou yoghourt) peut se décliner avec un taux de matière grasse variable, selon celui du lait utilisé pour sa fabrication et des matières laitières ajoutées. Il peut être nature, sucré ou non, ou contenir des ingrédients autres que laitiers qui ne doivent pas représenter plus de 30% du poids final du yaourt (morceaux de fruits, miel, confiture, arômes naturels ou de synthèse autorisés). Ces ingrédients sont pasteurisés ou stérilisés avant d'être incorporés. L'addition de stabilisateurs, épaississants ou gélifiants hormis ceux provenant des préparations de fruits, est interdite (**GEMRCN, 2009**).

Les critères pris en compte par le *Codex alimentarius* et la FIL (Fédération Internationale Laitière) dans la réglementation du yaourt sont les suivants :

- **Types de produit** : ils sont définis souvent en fonction de leur teneur en matière grasse ou de l'adjonction éventuelle d'ingrédients (yoghourt partiellement écrémé ou maigre, yoghourt écrémé, le yoghourt sucré et le yoghourt nature).
- **Le type de ferment utilisé** : selon la FIL, et de nombreux pays, la dénomination «yaourt» nécessite l'utilisation obligatoire et exclusive des deux ferments caractéristiques *Streptococcus thermophilus* et *Lactobacillus delbrueckii* subsp *bulgaricus* (**Luquet et Carrieu, 2005**).
- **La quantité de ferment contenue dans le produit fini** : la FIL fixe la quantité de ferments vivants, égale à 10^7 bactéries par gramme rapportés à la partie lactée jusqu'à la date limite de consommation.
- **La viabilité de la flore lactique** : flore viable pendant toute la durée de vie.
- **Ingrédients laitiers** : lait pasteurisé, congelé, écrémé, concentré, en poudre, crème et caséines etc.
- **Ingrédients non laitiers** : une multitude d'ingrédients peut être incorporée dans le yaourt. Il peut s'agir par exemple de fruits sous différentes formes (purée, jus, pulpe, sirop etc.), de céréales, de

légumes ou de sucre. La quantité d'ingrédients non laitiers est fixée par le *Codex alimentarius*, la FIL et la plupart des pays à moins de 30% en poids du produit fini.

- **pH** : La FIL préconise une teneur de 0,7% d'acide lactique. Cette valeur est respectée dans certains pays avec une variabilité de 0,6 à 15%. Certaines normes imposent un pH inférieur à 4,5 ou 4,6.

- **Taux de matière grasse** : Il doit être au minimum, inférieur à 3% (m/m) dans le cas des yaourts (nature, sucré ou aromatisé), compris entre 0,5 et 3% dans le cas des yaourts partiellement écrémés et 0,5% dans les yaourts écrémés.

- **Teneur en protéines** : elle est égale à 2,8% dans le produit fini.

II.3 Matières premières utilisées pour la fabrication du yaourt

II.3.1 Le lait

La principale matière première pour la fabrication des yaourts est le lait dont, pour l'essentiel, le lait de vache. Il est constitué d'environ 88% d'eau et de 12% de matière sèche contenant des glucides, des protéines, des lipides et des minéraux (**Tamime et Robinson, 1985**).

Afin d'accroître la viscosité apparente et la consistance des yaourts, la teneur en matière sèche du lait écrémé utilisé est augmentée au préalable jusqu'à 10-12% (**Van Marle, 1998 ; Schkoda et al., 2001**). Après concentration (par évaporation ou osmose inverse) ou, plus fréquemment, addition de poudre de lait écrémé ou de protéines de lactosérum (**Mahaut et al., 2000**), on parlera alors de lait écrémé fortifié ou enrichi.

Des agents de texture (épaississants ou gélifiants) peuvent être ajoutés dans le cas des yaourts brassés sans matière grasse, afin d'améliorer l'apparence, la viscosité et la consistance de ces derniers.

Le lait peut être additionné de sucre avant la fermentation, à hauteur de 5 à 10 %. Cette addition conditionne le choix des ferments, car certaines souches sont sensibles à la diminution de l'activité de l'eau qui résulte de cette opération. Parfois, le sucre est apporté en deux fois, une partie avant la fermentation, une partie après, pour ne pas ralentir l'acidification. Le sucre est généralement constitué de saccharose, cristallisé ou sous forme liquide (sirop).

Il est aussi courant d'utiliser du sucre inverti (sirop de saccharose hydrolysé), qui contient, à parts égales, du glucose et du fructose. Son intérêt est qu'il reste liquide à des teneurs élevées en matières sèches (65 à 67 %). Il existe aussi des sirops de sucre inverti dont une partie du glucose a été isomérisé en fructose (sirops à haute teneur en fructose). Ils ont l'avantage de présenter un pouvoir sucrant plus élevé que les précédents. Enfin, dans le cas des produits allégés, le sucrage est

effectué par addition d'édulcorants (aspartam ou polyols). Comme ces produits sont sensibles au chauffage, ils sont toujours ajoutés après le traitement thermique (Meghachou, 2014).

II.3.1.1 Problématique du lait en Algérie

Le lait occupe une place importante dans la ration alimentaire de la population algérienne dont les besoins sont estimés à 3,2 milliard de litres, la consommation moyenne du lait est de l'ordre de 100 à 110 l/habitant/an. La production nationale, estimée à 3.52 milliard de litres par an en 2017 dont plus de 2,58 milliards de litre de lait de vache (73%). Cette production ne couvre que 40 % des besoins. Le reste est importé sous forme de poudre de lait et de matière grasse laitière anhydre (MGLA) à lesquelles il faut rajouter d'autres ingrédients de fabrication (levains, enzymes coagulantes, arômes... etc) (Ministère de l'Agriculture, du développement rural et de la pêche, 2018).

Tableau VI: composition typique du lait de vache (Alais et Liden, 1987).

| Constituants | Concentration (g/l) |
|---|---------------------|
| Eau | 905 |
| Glucides : lactose | 49 |
| Lipides | 35 |
| Matière grasse proprement dite | 34 |
| Lécithine (phospholipide) | 0,5 |
| Partie insaponifiable (stéroïls, carotène, tocophérols) | 0,5 |
| Protides | 34 |
| Caséïnes | 27 |
| Protéïnes solubles (Globulines, Albumines) | 5,5 |
| Substances azotés non protéïques | 1,5 |
| Sels | 9 |
| De l'acide citrique | 2 |
| De l'acide phosphorique | 2,6 |
| De l'acide chlorhydrique (Na Cl) | 1,7 |
| Vitamines, enzymes, gaz dessous | Traces |
| Extrait sec total | 127 |
| Extrait sec non dégraissé | 92 |

Ce déficit fait en sorte que les structures des unités de transformation étatiques et privées fonctionnent en majeure partie grâce au traitement du lait recombinaé à partir de poudre de lait et de MGLA importées. Néanmoins, ces dernières années des tonnages sans cesse croissants en lait collecté à travers plusieurs fermes d'élevages nationales sont utilisés tels quels ou mélangés au lait recombinaé (à différentes proportions) dans les fromageries et yaourtières.

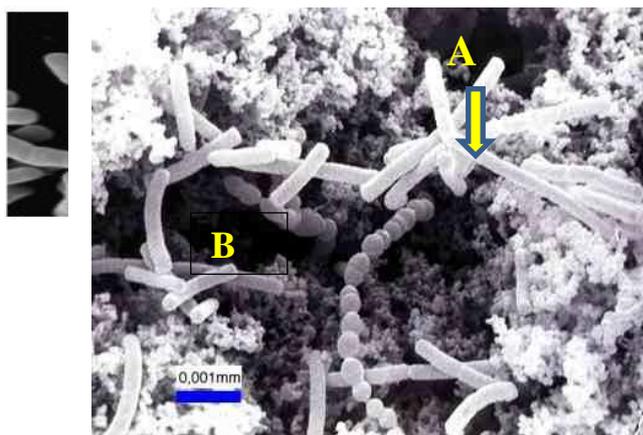
En dehors du souci de combler le déficit et répondre aux besoins de la population algérienne, le lait frais de collecte est de nature à améliorer sensiblement la qualité organoleptiques des produits fabriqués, en tenant compte que la multiplication des traitements technologiques opérés généralement pour l'obtention de la poudre, pour sa reconstitution et pour la stabilisation de son état physico-chimique et hygiénique, ce qui engendre inéluctablement des effets néfastes sur la qualité finale du produit obtenu (Yakhlef *et al.*, 2010).

II.3.2 Bactéries caractéristiques du yaourt

a. *Streptococcus thermophilus*

St. thermophilus est un cocci Gram positif, anaérobie facultative, non mobile. On le trouve dans les laits fermentés et les fromages. C'est une bactérie dépourvue d'antigène du groupe D, thermorésistante, sensible au bleu de méthylène (0,1%) et aux antibiotiques (Dellaglio *et al.*, 1993 ; Roussel *et al.*, 1994). Elle est aussi résistante au chauffage à 60°C pendant 30 minutes Elle est isolée exclusivement du lait et des produits laitiers sous forme de coques disposées en chaînes de longueurs variables ou par paires. Sa température optimale de croissance varie entre 40 et 50°C. Son métabolisme est du type homofermentaire (Lamoureux, 2000).

Le rôle principal de *St. Thermophilus* est la fermentation du lactose du lait en acide lactique et en plus de son pouvoir acidifiant, elle est responsable de la texture dans les laits fermentés. Elle augmente la viscosité du lait par production de polysaccharides (composés de galactose, glucose, ainsi que de petites quantités de rhamnose, arabinose et de mannose) (Bergamaier, 2002).



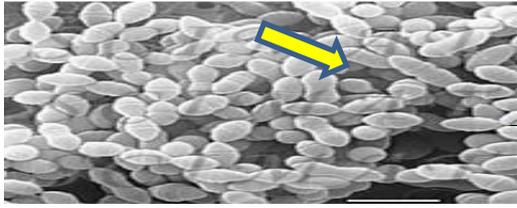


Figure n°6: Bactéries lactiques du yaourt : **A** (*Lb. Bulgaricus*), **B** (*St. Thermophilus*)

b. *Lactobacillus bulgaricus*

Lb. Bulgaricus est un bacille Gram positif, immobile, asporulé, microaérophile. Il est isolé sous forme de bâtonnets ou de chainettes. Il possède un métabolisme strictement fermentaire avec production exclusive d'acide lactique comme principal produit final à partir des hexoses de sucres par voie d'Embden Meyerhof. Il est incapable de fermenter les pentoses.

Lb. bulgaricus est une bactérie thermophile, très exigeante en calcium et en magnésium et sa température optimale de croissance est d'environ de 42 °C. Cette bactérie a un rôle essentiel dans le développement des qualités organoleptiques et hygiéniques du yaourt (**Marty-Teyssset et al., 2000**).

II.3.2.1 Intérêt et fonctions des bactéries du yaourt

II.3.2.1.1 Production d'acide lactique.

La production d'acide lactique est 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 (**Schmidt et al., 1994**). Le métabolisme est de type homofermentaire (production exclusif de l'acide lactique). L'acidité du yaourt est communément exprimée en degré Dornic (1°D = 0.1g/l d'acide lactique), et elle se situe entre 100 et 130°D (**Loones, 1994**).

L'importance de l'acide lactique durant la fabrication du yaourt peut se résumer comme suit :

- Il aide à déstabiliser les micelles des caséines, ce qui conduit à la formation du gel.
- Il donne au yaourt son goût distinct et caractéristique, comme il contribue à la saveur et à l'aromatisation du yaourt (**Tamime et Robinson, 1999 ; Singh et al., 2006**).
- Il intervient comme inhibiteur vis-à-vis des micro-organismes indésirables (**Leory et al., 2002**).

II.3.2.1.2 Activité protéolytique

Pour satisfaire leurs besoins en acides aminés, les bactéries du yaourt doivent dégrader la fraction protéique du lait constituée de caséine et de protéines sériques, leur système protéolytique est constitué de deux types d'enzymes distinctes : les protéases et les peptidases. *Lb. bulgaricus* possède des protéases localisées, pour l'essentiel, au niveau de la paroi cellulaire (Marshall, 1987). Cette activité protéasique permet d'hydrolyser la caséine en polypeptide. *St. thermophilus* est considéré comme ayant une faible activité endopeptidasique. Elle dégrade les polypeptides par son activité exopeptidasique en acides aminés libres.

II.3.2.1.3 Activité aromatique

Divers composés volatiles et aromatiques interviennent dans la saveur et l'appétence du yaourt. C'est principalement le lactose qui intervient dans la formation de ces composés. Parmi ceux-ci, l'acide lactique confère au yaourt son goût acidulé. L'acétaldéhyde, qui provient en grande partie de la thréonine, joue un rôle essentiel dans ces caractéristiques organoleptiques recherchées. La concentration optimale de ce métabolite est estimée à environ 10 ppm. Sa production, due principalement au lactobacille, est augmentée lorsque ce dernier est en association avec le streptocoque qui en élabore de faibles quantités.

L'acétaldéhyde peut provenir :

- Du pyruvate, soit par action de la pyruvate décarboxylase ou par action de la pyruvate déshydrogénase (appelée aussi pyruvate formate lyase).
- De la thréonine par l'action de la thréonine aldolase.

Le diacétyle contribue à donner un goût délicat qui est dû à la transformation de l'acide citrique et du lactose par certaines souches de streptocoques. D'autres composés (acétone, acétoïne, etc.) contribuent à l'équilibre et à la finesse de la saveur. Ceci résulte d'un choix avisé des souches, de leur capacité à produire dans un juste rapport les composés aromatiques et du maintien de ce rapport au cours de la conservation des levains et de la fabrication.

La saveur caractéristique du yaourt, due à la production du diacétyle et de l'acétaldéhyde et qui est recherchée dans les produits type «nature», et est en partie masquée dans les yaourts aromatisés. (FAO, 1995).

II.3.2.1.4 Activité texturante

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

glucose des polysaccharides qui en formant des filaments limitent l'altération du gel par les traitements mécaniques et contribuent à la viscosité du yaourt.

L'augmentation de la viscosité du yaourt est en général attribuée à la production d'exopolysaccharide (EPS) qui, selon une étude portant sur plusieurs souches serait essentiellement composée de rhamnose, de arabinose, et de mannose (**Schmidt et al., 1994**).

Il est couramment admis que la production des EPS est le résultat de l'action exercée par *St. thermophilus*. D'après **Tamime (1999)**, *Lb. bulgaricus* possède une aptitude à produire des EPS composés de galactose, glucose, rhamnose à des rapports de 4/1/1.

II.3.2.2 Comportement associatif des deux souches

St. thermophilus et *Lb. bulgaricus* se développent en association, appelée proto-coopération, dans des cultures mixte (figure n°5) ayant un intérêt à la fois d'ordre technologique et nutritionnel (**Driessen, 1981 ; Radke-Michell et Sandine, 1984 ; Radke-Michell et Sandine, 1986**).

Ces bactéries, par leur activité acidifiante, ont un effet bénéfique du point de vue qualité hygiénique de produit. En parallèle, elles engendrent des produits secondaires qui contribuent à la qualité organoleptiques du yaourt. D'un point de vue nutritionnel l'activité fermentaire de ces espèces lactiques favorise une solubilisation des différents constituants du lait améliorant ainsi leur biodisponibilité (**Courtin et al., 2002 ; Ngounou et al., 2003**).

Lors de la production de yaourt l'utilisation combinée des deux espèces bactériennes permet de valoriser l'interaction indirecte positive existante entre elles. Cette interaction appelée proto-coopération se traduit d'abord par une augmentation des vitesses d'acidification par rapport aux vitesses observées en cultures pures, la coagulation du lait prend 6-10h à 45°C en culture pure et 2-2,5h en culture mixte (**Pette et Lolkema, 1951 ; Davis, 1971**). Un accroissement des concentrations bactériennes est observé en parallèle (**Amoroso et Nanca, 1990**) avec une résistance plus élevée à l'acidité du milieu (**Flejtas et Gruev, 1977 ; Accolas et al., 1982 ; Radke-Michell et Sandine, 1986 ; Juillard et al., 1988**). Elle induit également une amélioration de la production des composés d'arômes (acétaldéhyde notamment) (**Abou-Donia, 1986 ; Matalon, 1986 ; Flejtas et Gruev, 1977 ; Chomakov, 1987 ; Obretenova, 1987**) et de la stabilité physique du produit (réduction des problèmes de synérèse) (**Kondratenko et al., 1985 ; Abou-Donia, 1986 ; Matalon et Sandine, 1986 ; Ernest, 1990**).

II.3.2.3 Facteur influençant la proto-coopération des deux souches

Le métabolisme mutuel de *Lb. bulgaricus* et *St. thermophilus* dans le lait est montré dans la figure n°7 et commenté dans plusieurs documents (**Driessen, 1981 ; Driessen et Kingma, 1982**) nous citerons quelques-unes des interactions fondamentales entre les deux espèces dans la culture de départ.

La stimulation de *St. thermophilus* par *Lb. bulgaricus* est réalisée grâce à l'activité protéolytique du lactobacille, qui libère des petits peptides et des acides aminés au profit du streptocoque (**Driessen et Kingma, 1982 ; Tammam et al., 2000**). Les plus importants de ces acides aminés nécessaires à la croissance mutuelle des deux souches sont : l'histidine, la thréonine, la valine (**Tamime et Robinson, 2003**).

En retour, *St. thermophilus* fournit de l'acide formique et du CO₂ qui tous deux vont stimuler la croissance de *Lb. bulgaricus* (**Bottazzi et al., 1972 ; Kosikowski, 1982 ; Tamime et Robinson, 2003**). *St. thermophilus* assimile l'oxygène dans le lait plus rapidement, créant ainsi des conditions favorables pour la croissance de *Lb. bulgaricus* (**Yaygin, 1970 ; Kosikowski, 1982 ; Tamime et Robinson, 2003**). Selon certains auteurs *St. thermophilus* produit de grandes quantités de dioxyde de carbone (CO₂) qui n'est pas issu du métabolisme du lactose (**Driessen et Kingma, 1982 ; Thunell et Sandine, 1985**), ce CO₂ produit est dû à l'activité de l'uréase qui hydrolyse l'urée du lait en CO₂ et NH₃ (**Eck et Gillis, 1997 ; Juillard et al., 1998**). Certaines souches de *St. thermophilus* ne possèdent pas cette activité protéasique (**Simova, 2007 ; Angelov et al., 2009**), par conséquent certains auteurs expliquent cette production de CO₂ par la voie de Leloir selon laquelle le galactose produit est transformé en acide lactique et en CO₂, assurant ainsi les conditions d'anaérobiose pour la croissance des lactobacilles.

Lorsque d'autres bactéries notamment, probiotiques, sont associées aux bactéries du yaourt, d'autres interactions prennent place. Par exemple, les bifidobactéries sont stimulées par l'activité protéolytique des lactobacilles alors que *Lb. bulgaricus* limite le développement de *Lb. acidophilus* (phénomènes de compétition et d'inhibition).

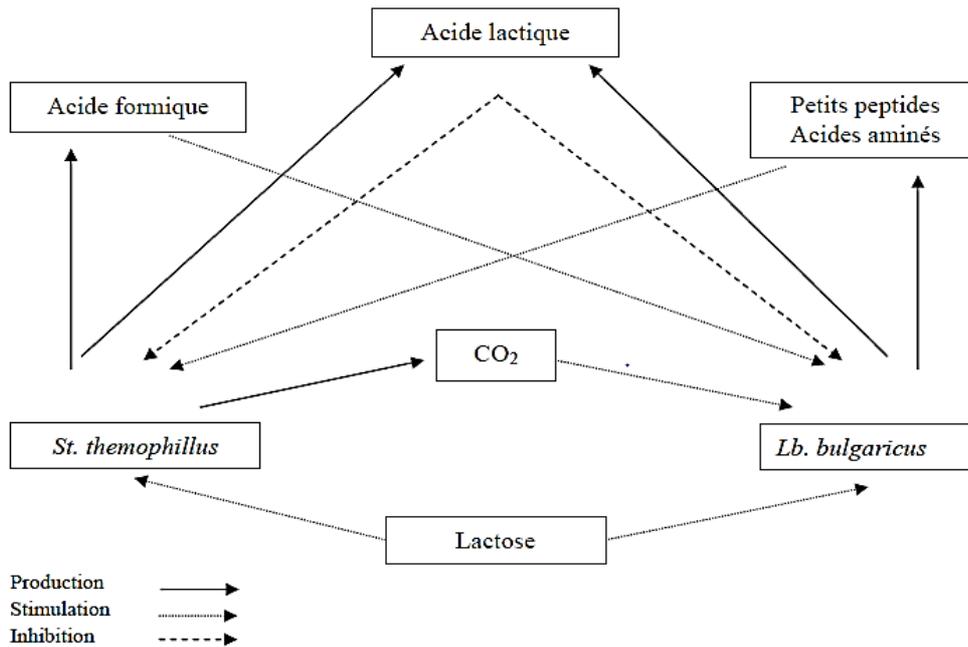


Figure n°7 : Schéma illustrant les interactions de *Streptococcus thermophilus* et *Lactobacillus bulgaricus* en culture mixte dans le lait (Mahaut *et al.*, 2000)

En outre, des phénomènes de croissance associative ont été démontrés entre *St. thermophilus* et *Lb. helveticus* ou *Lb. acidophilus*. Enfin, des mécanismes d'inhibition spécifique entre les souches liés à la production de bactériocines existent chez les bactéries probiotiques comme chez les bactéries du yaourt. Ces caractères sont toutefois dépendants des souches présentes dans le milieu. Il est donc nécessaire de vérifier la compatibilité des souches avant de les associer (Beal et Sodini, 2003).

II.3.2.4. Principaux facteurs influençant le métabolisme des bactéries lactiques

La croissance et l'acidification des bactéries lactiques sont fortement influencées par des facteurs physiques, chimiques et microbiologiques. En outre les effets de ces facteurs peuvent interagir ensemble sur leur activité métabolique.

II.3.2.4.1. Facteurs physiques

❖ **La température** est le premier facteur environnemental à considérer pour le développement des bactéries lactiques. Elle agit sur les vitesses des réactions chimiques et biochimiques. Elle doit être aux alentours de 30°C pour les bactéries mésophiles et de 42°C pour les espèces thermophiles.

❖ **L'activité de l'eau (aw)** est liée à la présence de sels ou de sucres. Lorsqu'elle diminue la quantité d'eau libre décroît et la disponibilité des nutriments est affectée. Concernant les laits fermentés seule la présence de saccharose (cas des yaourts sucrés) peut diminuer cette activité. C'est le cas lorsque cette dernière devient inférieure à 0,99 correspondant à une concentration en saccharose de 10 %, l'activité métabolique des bactéries est affectée (**Tamime et Robinson, 1985**).

II.3.2.4.2 Facteurs chimiques

➤ **La qualité du lait** est un facteur d'influence prépondérante pour le développement des bactéries lactiques. On parle des teneurs initiales en lactose, en sels minéraux et de la fraction azotée libre (acides aminés et oligopeptides). La limitation en certaines molécules peut constituer un frein à la croissance.

➤ **Le traitement thermique** subi par le lait avant l'étape de fermentation va agir favorablement sur le métabolisme des bactéries. En effet, outre son rôle principal de destruction des microorganismes indésirables et pathogènes (**Boudier, 1990**), il permet de détruire les principales substances antibactériennes naturellement présentes dans le lait (agglutinines, lactoperoxydases) ce qui favorisera les croissances bactériennes (**Farkye et Imafidon, 1995**). De plus, il génère de faibles quantités d'acide formique à partir du lactose, ce qui stimulera la croissance des lactobacilles (**Loones, 1994**). Enfin, il contribue à l'augmentation de la teneur du lait en petits peptides et en acides aminés libres.

➤ **Le pH** est le troisième facteur chimique important pour la croissance des bactéries lactiques. Il intervient sur la disponibilité en nutriments du milieu, sur la perméabilité de la membrane cellulaire et sur les vitesses d'activité enzymatique. Son contrôle est impératif lors de la production de yaourt puisqu'il représente un facteur majeur de ralentissement du métabolisme bactérien (**Beal et Sodini, 2003**).

II.3.2.4.3. Facteurs microbiologiques

• **Le taux d'ensemencement** du lait avec les bactéries lactiques influence fortement sa transformation. Plus il est élevé, plus rapide est la fermentation. Généralement, ce taux se situe autour de 10^6 UFC/ml (UFC : unités formant colonie) afin d'obtenir des durées de fabrication courtes et de limiter le coût d'achat des ferments. Pour un ensemencement direct cela correspond à un taux d'inoculation compris entre 2,5 g et 70 g pour 100 L de lait selon l'espèce bactérienne considérée (**Beal et Corrieu, 1991**).

- **Les équilibres de population** agissent également sur les cinétiques microbiennes. Ainsi dans le cas de la fabrication du yaourt la durée de la fermentation varie selon la valeur initiale du rapport entre streptocoques et lactobacilles, même si en fin de culture les streptocoques sont toujours majoritaires. Pour le yaourt la proportion entre streptocoques et lactobacilles habituellement préconisée est de 1:1 mais elle dépend fortement des souches en présence (**Beal et Corrieu, 1991**).

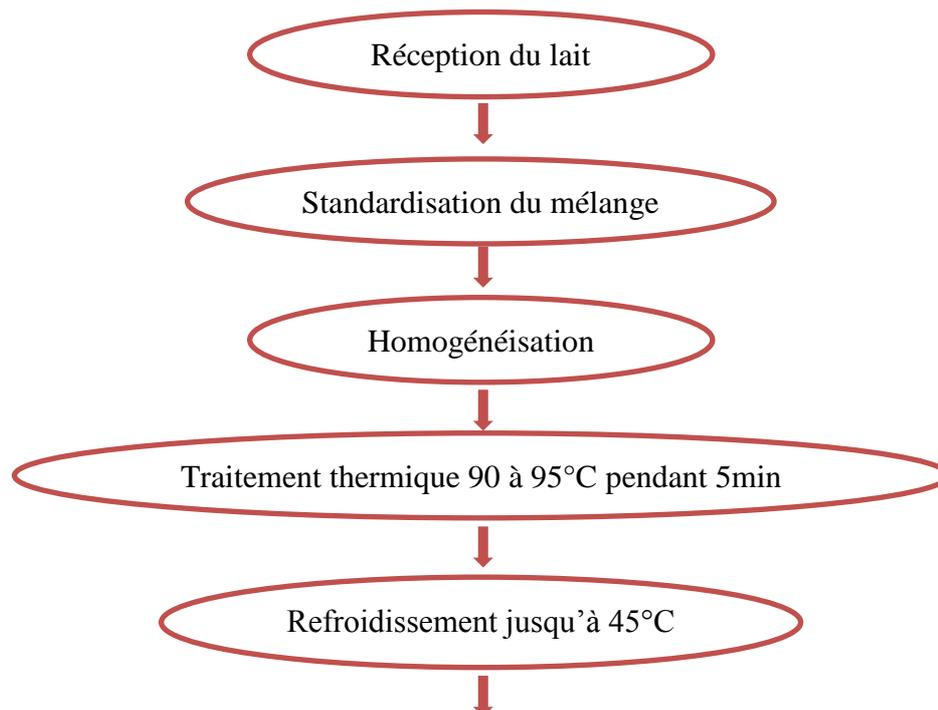
II.3.2.5. Grandes étapes de la fabrication des yaourts

Les procédés de fabrication des yaourts et des laits fermentés se caractérisent par trois grandes étapes : la préparation du lait, la fermentation et les traitements post-fermentaires du produit. Le diagramme de production diffère selon le type de produit (yaourt ferme ou brassé) et présente des variantes selon sa teneur en matières grasses et son arôme. Le diagramme général de production (**figure n°8**) présente les étapes de la fabrication qui sont détaillées aux paragraphes suivants :

II.3.2.5.1. Standardisation du mélange

Pour bien assimiler l'importance de la standardisation ou de l'enrichissement du lait sur la qualité finale du yaourt, il est nécessaire de donner le rôle de chaque composant du lait.

- Le gras a un effet sur l'onctuosité et la sensation de douceur en bouche



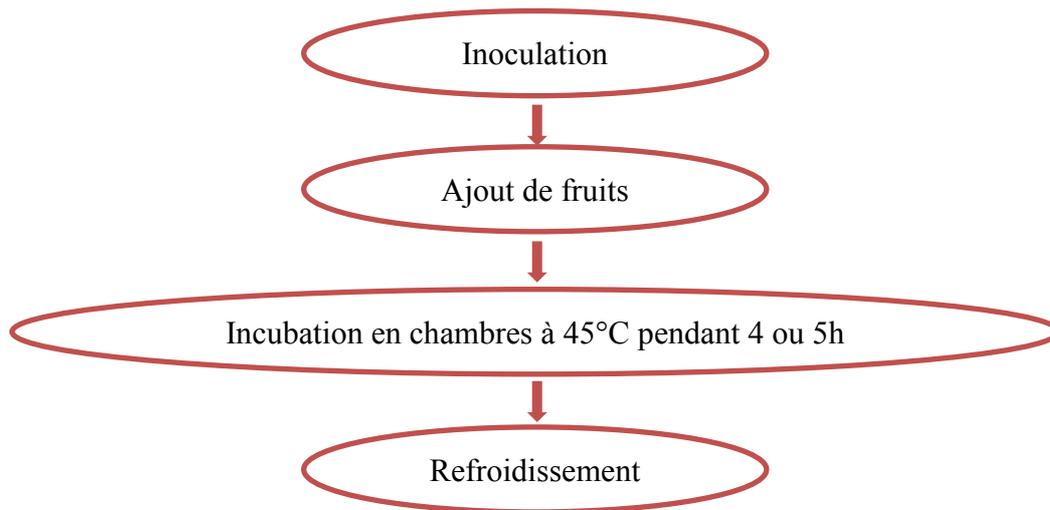


Figure n° 8: Diagramme de fabrication des yaourts (Loones, 1994).

- Le lactose est la matière première utilisée pour l'acidification et a un pouvoir sucrant, soit quatre fois plus faible que celui du sucre.
- Les protéines, de par leur coagulation et leur capacité de liaison avec l'eau, agissent sur la texture, particulière sur la viscosité, la consistance, l'élasticité et la fermeté.
- Les minéraux, comme des boulons travaillent à la stabilisation du gel (Vignola, 2002).

II.3.2.5.2. Homogénéisation

Elle a principalement des effets sur deux composantes du lait, soit la matière grasse et les protéines, réduit le diamètre des globules gras et permet ainsi une meilleure dispersion de ceux-ci dans le produit, limite leurs remontées au cours de l'incubation et donne une consistance plus uniforme au yaourt fabriqué. Le tableau VII donne les causes possibles d'homogénéisation inadéquate d'un mélange et les incidences sur la qualité du yaourt.

Tableau VII : Causes possibles d'homogénéisation inadéquate d'un mélange et incidences sur la qualité du yaourt (Vignola, 2002).

| Causes | Incidences sur la qualité du yaourt |
|--------|-------------------------------------|
|--------|-------------------------------------|

| | |
|------------------------------------|---|
| <p>Pression trop faible</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Séparation du gras, obtention de deux phases (présence d'une surface très crémeuse) - Présence d'un goût d'eau dans le produit - Non uniformité de la couleur - Produit plus liquide, donc une consistance et une viscosité moindres - Synérèse |
| <p>Pression trop forte</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Diminution dans l'onctuosité - Viscosité et consistance inappropriées en raison d'un bris des protéines, produit plus liquide - Présence de mousse ou de bulles à la surface |

II.3.2.5.3. Le traitement thermique

Le lait enrichi éventuellement sucré subit un traitement thermique. Le barème de traitement thermique le plus couramment utilisé est de 90-95°C pendant 3 à 5 minutes (**Mahaut et al., 2000 ; Boudier, 1990**). À l'issue du traitement thermique, le lait est refroidi à la température de fermentation. Ce traitement a de multiples effets sur la flore microbienne ainsi que sur les propriétés physico-chimiques et fonctionnelles du lait. Tout d'abord, il crée des conditions favorables au développement des bactéries lactiques. Il détruit les germes pathogènes et indésirables (**Boudier, 1990**) et inactive des inhibiteurs de croissance tels que les lactopéroxydases (**Farkye et Imafidon, 1995**).

De même, il réduit les sulfures toxiques et entraîne la production d'acide formique qui est un facteur de croissance pour *Lb. bulgaricus* (**Loones, 1994**). Le traitement thermique a également un effet sur la conformation tridimensionnelle des protéines du lactosérum (85%) qui se fixent ainsi sur les molécules de caséines. Enfin, il modifie les équilibres salins en entraînant une augmentation de la taille des micelles des caséines, de leur stabilité et de la qualité d'eau liée (**Mahaut et al., 2000**).

Au niveau rhéologique ces modifications se traduisent par une amélioration après fermentation de la fermeté des gels (**Kalab et al., 1976 ; Mottar et al., 1989**). De plus, le traitement thermique entraîne une production plus importante d'acétaldéhyde le composé responsable de l'arôme du yaourt (**Singh, 1983**).

II.3.2.5.4. Fermentation lactique

Le lait enrichi et traité thermiquement est refroidi à la température de fermentation 40-45°C. Cette température correspond à l'optimum de développement symbiotique des bactéries lactiques (**Loones, 1994**). Leur inoculation se fait à un taux assez élevé variant de 1% à 7%, pour un ensemencement indirect à partir d'un levain avec un ratio *Streptococcus thermophilus/Lactobacillus bulgaricus* de 1,2 à 2 pour les yaourts nature et pouvant atteindre 10% pour les yaourts aux fruits (**Boudier, 1990 ; Mahaut et al., 2000**). L'ensemencement direct à partir des bactéries lactiques concentrées congelées se fait à des taux de l'ordre de 0,03 %. Les deux espèces *Streptococcus thermophilus* et *Lactobacillus bulgaricus* vivent en symbiose et en synergie. Lors de leur croissance elles dégradent le lactose en acide lactique entraînant une baisse du pH et la gélification du milieu avec des modifications structurales irréversibles.

En outre, ces bactéries produisent des composés carbonylés volatils (l'acétaldéhyde, le diacétyl, l'acétoïne, l'acétate d'éthyle) (**Imhof et al., 1994; Ott et al., 1997**) et des exopolysaccharides (**Cerning et al., 1990**) qui participent respectivement à l'élaboration de l'arôme et à la texture des yaourts.

Lorsque le pH atteint une valeur comprise entre 4,3 et 4,7 un refroidissement en deux temps (rapide jusqu'à 25°C, puis plus lent jusqu'à 5°C) est appliqué afin de stopper la fermentation. En effet l'activité des bactéries lactiques est limitée pour des températures inférieures à 10°C (**Tamime et Robinson, 1985**).

II.3.2.5.5. Conditionnement et stockage

Les yaourts conditionnés dans des pots en verre ou en plastique sont stockés en chambres froides à 4°C en passant au préalable dans des tunnels de refroidissement. A ce stade ils sont prêts à être consommés. La durée limite de leur consommation est de 28 jours (**Luquet et Corrieu, 2005 ; Paci Kora et al., 2004**). Pendant le stockage les bactéries lactiques maintiennent une activité réduite. Cette évolution appelée post-acidification se traduit par une légère baisse du pH surtout pendant les 2 premiers jours de stockage.

II.4 Structure et comportement rhéologique des yaourts

La transformation du lait au yaourt s'accompagne de la mise en place d'une structure complexe et d'un changement important des propriétés rhéologiques en passant d'un liquide

Newtonien à un gel viscoélastique à destruction non réversible. Les additifs et les étapes du procédé de fabrication jouent un rôle majeur sur le comportement rhéologique du yaourt qui sera apprécié par le consommateur (**Paci Kora et al., 2004**).

II.4.1 Structure des yaourts

a) Gélification acide

Les structures principales impliquées lors de la gélification acide du lait sont les micelles de caséine. En effet, dans le lait, les différents types de caséines (α_{s1} , α_{s2} , β et k) s'associent pour former des micelles, de structure sphérique supramoléculaire et de diamètre moyen de 150 nm. Différents modèles théoriques de l'organisation micellaire sont proposés dans la littérature (**Cayot et Lorient, 1998**). Les auteurs s'accordent néanmoins sur une structure générale très hiérarchisée (figure n°9). La micelle est composée d'un cœur hydrophobe essentiellement constitué des caséines α , β et k , dont la partie terminale est très hydrophile et chargée négativement.

Les caséines sont situées à la surface des micelles et assurent le maintien en suspension dans la phase aqueuse en constituant une sorte de chevelure. La micelle possède un degré d'hydratation élevée. La structure micellaire est maintenue grâce à des liaisons faibles, des ponts salins impliquant le calcium ou le phosphate de calcium et des groupements phosphoryles ou carboxyles de certaines chaînes latérales des caséines, ainsi que des interactions hydrophobes (**Paci Kora et al., 2004**).

Lors de la baisse du pH, due à la fermentation lactique, les micelles de caséines subissent des changements substantiels. Le déplacement de l'équilibre acido-basique entraîne une diminution progressive de la charge ionique des micelles qui devient nulle. En parallèle, une solubilisation du phosphate de calcium micellaire est observée, entraînant la dissolution de la structure micellaire. Par la suite, la solubilité des caséines se trouve fortement diminuée, ainsi que leur capacité d'hydratation. Le pH auquel commence la gélification du lait dépend de la température et des prétraitements thermiques du lait (**Tamime et Robinson, 1985**). En dessous d'un pH de 5,5, lorsque la majorité des ions calcium et phosphate ont quitté la micelle, celle-ci reste encore visible au milieu d'une quantité croissante de très petites particules jusqu'à ce qu'un pH de 5,2 soit atteint (**Heertje et al., 1985 ; Visser et al., 1986**).

Pour des pH plus bas, des particules de caséines se créent à nouveau par la formation des liaisons hydrophobes, hydrogènes et électrostatiques. Bien qu'elles ressemblent aux micelles de caséines initiales, elles sont plus grosses et très différentes à cause de l'absence de phosphate de

calcium. Les particules ainsi formées constituent un réseau donnant naissance à un gel retenant la phase aqueuse. A un pH inférieur au point isoélectrique des caséines (pH = 4,60), le réseau se stabilise et n'évolue pratiquement plus. Pendant la phase de coagulation, les caséines entraînent avec elles les protéines sériques.

La microstructure du yaourt est fonction de la concentration en matière sèche (Schkoda *et al.*, 1998 ; Van Marle, 1998), de la méthode d'enrichissement du lait (Tamime *et al.*, 1984), du traitement thermique (Kessler, 1998) mais aussi des souches bactériennes utilisées et de leur capacité à synthétiser des polysaccharides exocellulaires (EPS), augmentant la viscosité du gel (Hassan *et al.*, 1995). Ainsi, les travaux de Kessler (1998) montrent que les micelles de caséines d'un yaourt fabriqué à partir de lait chauffé forment des chaînettes bien liées entre elles, tandis qu'elles forment des agrégats dans un yaourt fabriqué à partir de lait non chauffé (figure n°10). Cette différence est essentiellement due au comportement des β lactoglobulines. Enfin, les sucres et les autres constituants mineurs restent solubilisés dans la phase aqueuse.

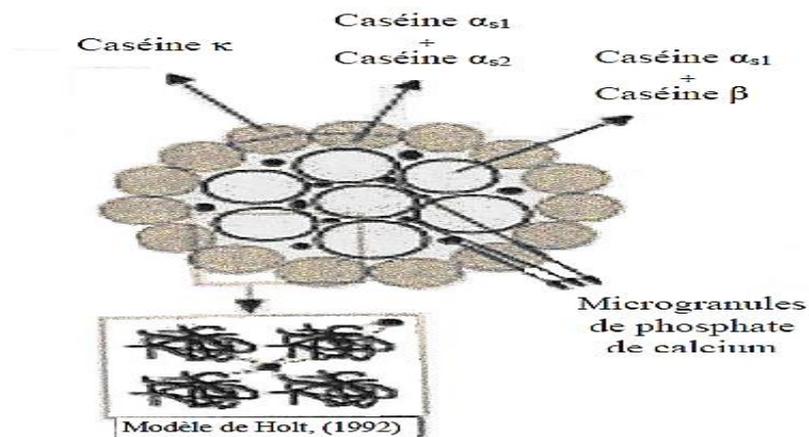


Figure n°9 : Modèle de structure de micelle de caséines (Ono et Obata, 1989).

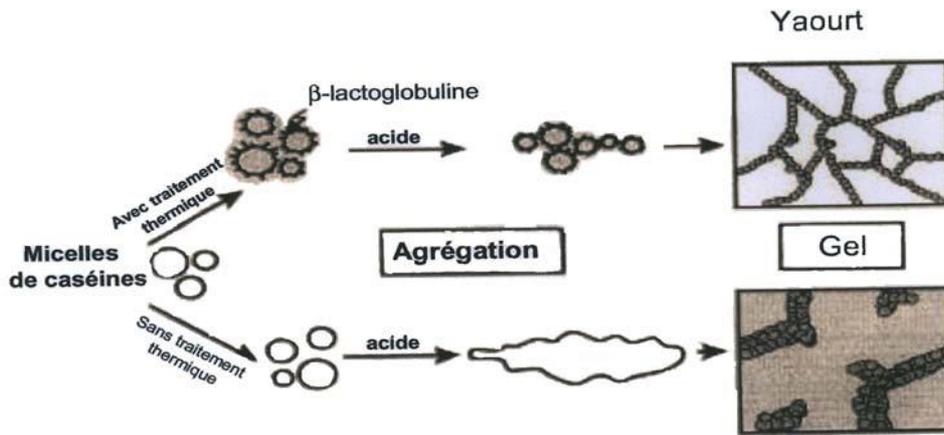


Figure n°10 : Effet du traitement thermique sur la microstructure du yaourt (Kessler, 1998)

II.4.2 Comportement rhéologique

a) Propriétés rhéologiques des yaourts

La connaissance du comportement rhéologique du yaourt est nécessaire pour la conception et le dimensionnement des installations de transformation, sous réserve de maîtriser les contraintes (cisaillements) notamment lors des étapes de brassage et de pompage ainsi que lors des échanges de chaleur. La connaissance des propriétés rhéologiques permet également d'appréhender la qualité en termes de texture des produits finis.

Le yaourt est défini comme un fluide viscoélastique. Il possède donc à la fois les propriétés visqueuses d'un liquide et les propriétés élastiques d'un solide. Le comportement rhéologique du yaourt est non-newtonien, ce qui veut dire que la viscosité du produit dépend de la vitesse de cisaillement ou de la contrainte exercée. La loi de Newton s'écrit:

$$\tau = \eta \dot{\gamma}$$

Où :

τ = viscosité (Pa.s),

$\dot{\gamma}$ = contrainte ou taux de cisaillement (Pa),

$\dot{\gamma}$ = vitesse de cisaillement (s^{-1}).

Dans le cas des yaourts, la viscosité diminue quand la vitesse de cisaillement augmente. C'est un fluide rhéofluidifiant. On parle alors de viscosité apparente à une vitesse de cisaillement

donnée. Les suspensions de polymères (polysaccharides, etc) présentent également le même comportement.

Le modèle le plus classique pour décrire le comportement d'un fluide rhéofluidifiant est le modèle d' Herschel Bulkley :

$$\eta_a = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} + \tau_0 / \dot{\gamma}$$

Avec :

η_a : viscosité apparente à la vitesse de cisaillement, $\dot{\gamma}$ (Pa.s) ;

K : indice de consistance (Pa.sⁿ) ;

n : indice d'écoulement (sans unité),

τ_0 : seuil d'écoulement (Pa).

Pour le yaourt brassé, le modèle se simplifie par une relation puissance car le seuil d'écoulement est nul ($\tau_0 = 0$).

Par ailleurs, le comportement rhéologique des yaourts est dépendant des traitements mécaniques subis ultérieurement. Si les contraintes de cisaillement sont trop fortes, le gel ne retrouve plus sa structure initiale. C'est un fluide partiellement thixotrope.

b) Méthodes de caractérisation

Le yaourt étant un produit de comportement rhéologique complexe, sa caractérisation s'avère assez délicate. Différents appareils de laboratoire sont utilisés pour caractériser leurs propriétés rhéologiques, à savoir le viscosimètre Brookfield, les rhéomètres rotatifs, les pénétromètres, ou encore, l'entonnoir de Posthumus. Généralement, les viscosimètres permettent de mesurer uniquement les propriétés visqueuses (viscosité apparente), tandis que les rhéomètres mesurent les propriétés visco-élastiques. En fonction de la géométrie du module de mesure, des contraintes ou des vitesses de cisaillements appliqués, les analyses réalisées déstructurent plus ou moins le gel lactique.

- **Les pénétromètres** ou les appareils de traction/compression sont largement utilisés pour caractériser la fermeté du yaourt ferme ou du yaourt brassé avant son brassage (**O'Neil et al., 1979 ; Barrantes et al., 1996**). **Hess et al. (1997)**, à l'aide d'un pénétromètre TA-XT2, ont déterminé les propriétés filantes du yaourt.

- **L'entonnoir de Posthumus** est une méthode simple et rapide pour mesurer la viscosité du yaourt brassé, qui est souvent appliquée en industrie laitière (**Hellinga et al., 1986**).

- **Le viscosimètre Brookfield** est également un appareil relativement simple, utilisé en routine, pour déterminer la texture des yaourts. Comme l'entonnoir de Posthumus, il ne permet de mesurer qu'un seul paramètre, la viscosité Brookfield.

Une caractérisation plus complète des propriétés rhéologiques des yaourts brassés est obtenue à l'aide des **rhéomètres rotatifs**. Deux types de mesures sont possibles :

1) à vitesse imposée : la vitesse de rotation ou la déformation est imposée ;

2) à contrainte imposée : un couple de torsion est imposé. Diverses géométries des modules existent : cône-plan, plan-plan et cylindres coaxiaux. Les systèmes cône-plan permettent de créer une vitesse de cisaillement uniforme dans l'entrefer, et sont donc les plus adaptés aux produits rhéofluidifiants, tels que le yaourt. Les mesures peuvent être effectuées en régime harmonique ou en continu. Elles consistent à imposer une grandeur (vitesse ou contrainte) dont l'amplitude varie de façon sinusoïdale avec une fréquence d'oscillation fixée. Pour un fluide purement élastique, la contrainte est en phase avec la déformation, tandis que pour un fluide purement visqueux, la contrainte est déphasée de 90° par rapport à la déformation. Dans le cas d'un fluide viscoélastique, tel que le yaourt, la contrainte est déphasée d'un angle compris entre 0 et 90° . Les composantes élastiques (G' (Pa)) et visqueuses (G'') sont calculées à partir de la grandeur enregistrée et de son déphasage par rapport à la grandeur imposée. La viscosité complexe du produit, prenant en compte les deux composantes, permet de caractériser le comportement rhéologique. De nombreux auteurs ont caractérisé les propriétés rhéologiques des yaourts (**Skriver et al., 1993 ; De Lorenzi et al., 1995; Rohm et Kovac. 1995; Hirano et al., 1998. Lucey et al., 1998; Ozer et al., 1998 ; Lucey et Singh, 1999; Fiszman et al., 1999; Shaker et al., 2000; Norziah et al., 2001 ; Mullineux et Simmons, 2007 ; Baba et al., 2018 ; Pan et al., 2018 ; Mudgil et al., 2018 ; Xu et al., 2019**) en effectuant des balayages en fréquence et en contrainte.

II.5 Caractéristiques nutritionnelles du yaourt

En plus de l'appréciation pour son goût et sa texture, le yaourt est un produit laitier très nutritif et facile à digérer, c'est une source riche de dix nutriments essentiels en particulier, certains minéraux et vitamines. La composition nutritionnelle du yaourt peut varier en fonction des souches de ferments lactiques utilisées dans la fermentation, du type de lait utilisé (lait entier, demi-écrémé

ou lait écrémé), des espèces de lait (vache, bovin, chèvre, mouton), des édulcorants et fruits ajoutés avant la fermentation ainsi que de la durée du processus de fermentation (**Weerathilake et al., 2014**).

Cependant, la composition générale du yaourt est plus ou moins similaire à celle du lait. Par conséquent, le yaourt est une source riche de protéines de lait, de glucides, de minéraux tels que le calcium et le phosphore, et de vitamines comme la riboflavine (B2), la thiamine (B1), la cobalamine (B12), l'acide folique (B9), la niacine (B3) et la vitamine A. Les protéines de lait disponibles dans le yaourt sont de haute qualité en raison de leur valeur biologique élevée et fournissent presque tous les acides aminés essentiels nécessaires au maintien d'une bonne santé (**Mckinley, 2005**).

En outre, les protéines disponibles dans le yaourt contiennent une teneur plus élevée en proline et en la glycine que dans le lait entier, ce qui permet d'améliorer l'absorption du calcium et la stimulation du système immunitaire (**Mckinley, 2005**). Le lactose est le principal hydrate de carbone présent dans le yaourt comme dans d'autres produits laitiers. La teneur en lactose dans le lait cru est d'environ 4,6%. Cependant, la teneur en lactose d'origine dans le lait est abaissée de 20 à 30% pendant le processus de fermentation, car le lactose est converti à ses formes simples de glucose et de galactose en raison de l'activité métabolique des bactéries lactiques.

La teneur en matière grasse du yaourt est fortement dépendante de la teneur en matière grasse du mélange original de yaourt. Selon les spécifications de l'**USDA** (United States Department of Agriculture) pour le yaourt à faible teneur en matière grasse et le yaourt non gras, la teneur en matière grasse varie de 0,5 à 3,25% (**USDA, 2001**). Cependant, la teneur en matière grasse du yaourt est très subjective comme certains produits; par exemple, le yaourt de style grec contient une teneur élevée en matières grasses pouvant atteindre 10%. Contrairement au lait, les procédés utilisés dans la fabrication du yaourt, tels que l'homogénéisation et la fermentation, entraînent la décomposition d'une certaine quantité de graisse en acides gras facilement digestibles et absorbables.

Les vitamines et les minéraux contenus dans le lait et les produits laitiers sont biodisponibles lorsqu'ils peuvent être absorbés et utilisés par l'organisme. Le yaourt comme les autres produits laitiers est une source exceptionnelle de plusieurs vitamines B en particulier, la riboflavine et la thiamine. Il est rapporté qu'une portion de 150g de yaourt nature entier et de yaourt nature allégé fournira respectivement 31% et 30% des besoins journaliers en riboflavine d'un adulte alors que la même portion de chaque type de yaourt fournira 23% et 45% de l'exigence journalière en thiamine d'un adulte (**Mckinley, 2005**).

Cependant, les concentrations en vitamine B12 et B6 sont significativement plus faibles que dans le lait car *Streptococcus thermophilus* utilise ces vitamines B pour son métabolisme. La teneur en acide folique / folate du yaourt peut varier en fonction de la composition des bactéries lactiques utilisées car certaines espèces de bactéries lactiques comme *S. thermophilus* et *Bifidobacteria* synthétisent certaines vitamines, y compris le folate (Mckinley, 2005).

II.6 Les variétés de yaourt

Le yaourt peut être classé en deux groupes différents, à savoir le yaourt de culture standard et le yaourt bio ou probiotique.

-**Les yaourts standards** font référence à ceux fabriqués avec *L. bulgaricus* et *S. thermophilus*. Ces bactéries ne sont pas réellement présentes dans l'intestin; cependant elles sont capables de stimuler la microflore amicale déjà présente dans l'intestin aidant à maintenir la santé intestinale générale.

- **les yaourts bio** sont fabriqués en cultivant des micro-organismes bénéfiques qui prétendent avoir de nombreux avantages pour la santé une fois ingérés, typiquement les souches probiotiques de *Bifidobacteria* et *L. acidophilus*. Contrairement aux cultures de yaourt standard, ces souches probiotiques seraient plus bénéfiques pour la santé et représenteraient les types de microflore amicale présente dans l'intestin (Dowden, 2013). Ce type de yaourt est plus populaire et a une saveur plus douce, plus crémeuse et moins acide.

Différentes variétés de yaourt peuvent être classées en fonction de la nature physique et chimique, des arômes ajoutés et des processus post-incubation.

II.6.1 Classification selon la composition chimique du produit

En se basant sur la teneur en matière grasse du yaourt, il peut être classé en trois variétés principales à savoir :

- **Yaourt ordinaire** : produit à partir du lait entier qui doit contenir au moins 3,25% de matières grasses laitières ;
- **Yaourt faible en gras** ;
- **Yaourt non gras (maigre)**.

Le yaourt à faible teneur en matière grasse et le yaourt non gras sont produits à partir de lait faible en gras ou de lait partiellement écrémé et de lait écrémé, respectivement (FDA, 2013).

II.6.2 Classification selon la saveur du produit

L'ajout de saveurs améliorerait l'attrait du consommateur tout en produisant une variété de produits. Les arômes peuvent être ajoutés immédiatement avant ou après l'homogénéisation. Les

yaourts peuvent être classés en yaourt nature, à base de fruits et aromatisé en fonction de la saveur particulière du yaourt.

✓ **Yaourt nature**

C'est la forme la plus simple et la moins adultérée du yaourt fabriqué par la fermentation bactérienne à l'acide lactique du lait pasteurisé afin de produire sa texture et sa saveur caractéristiques. En d'autres termes, il peut être défini comme le produit laitier fermenté ordinaire et non sucré ne contenant aucune couleur ajoutée ou aucun autre additif (**Dairy UK, 2009**). Par conséquent, il est plus proche de la valeur nutritionnelle du lait dont il est fait, et fournit tous les avantages associés à la fermentation tout en fournissant moins de calories. De plus, le yaourt nature donne le goût pur de yaourt et contient la teneur en calcium la plus riche parmi les produits de yaourt (**Dowden, 2013 ; Daily Australia, 2013**).

✓ **Yaourt aromatisé**

Les yaourts sont disponibles dans une vaste gamme de saveurs, y compris les fruits (pomme, abricot, cerise noire, cassis, bleuet, citron, mandarine, framboise, fraise, pêche), céréales, légumes, chocolat, vanille, caramel, gingembre, etc (**Goodness Direct, 2013**). En général, les arômes sont ajoutés au yaourt au cours de la production et la définition des arômes entraîne non seulement un large éventail de goûts, mais augmente également la douceur du produit (**Daily Australia, 2013**).

II.6.3 Classification selon les produits connexes au yaourt

Elle dépend des procédés de fabrication utilisés tels que le mélange avec d'autres mélanges, traitement thermique et séchage, qui peuvent donner naissance à une gamme de produits de yaourt, yaourt pasteurisé, yaourt UHT, yaourt séché, etc.

▪ **Yaourt pasteurisé et le yaourt UHT**

Ces types de yaourts sont produits après la fermentation en les soumettant à un traitement thermique avec différentes combinaisons temps-température (**Dairy UK, 2009**). Bien que ces types de produits de yaourt soient produits par les fabricants afin de prolonger la durée de conservation et / ou de diminuer l'acidité naturelle du yaourt, le traitement thermique peut détruire un nombre considérable de cultures vivantes et actives présentes, ce qui est considéré comme un inconvénient vis-à-vis les vertus du yaourt.

▪ **Yaourt glacé**

Le Code de Pennsylvanie définit le yaourt glacé comme un aliment qui est préparé par congélation en remuant un mélange pasteurisé constitué des ingrédients autorisés pour la crème glacée et qui doit contenir au moins 3,25% de matière grasse laitière, pas moins de 8,25% de

matières solides non grasses et au moins une acidité titrable de 0,3% exprimée en acide lactique (**The Pennsylvania Code, 1992a**). Alors que la version faible en gras ressemble plus à 0,5% mais moins de 2% de matière grasse laitière avec le même taux de matière grasse laitière solide (**The Pennsylvania Code, 1992b**).

▪ **Yaourt séché / poudre de yaourt**

La poudre de yaourt est produite en faisant fermenter du lait écrémé en utilisant des cultures de yaourt standard jusqu'à obtenir le pH souhaité, suivi d'une étape de séchage, très probablement par lyophilisation. En outre, la poudre de yaourt mélangée est fabriquée en mélangeant du lait écrémé de culture, du lactosérum cultivé, du concentré de protéines de lactosérum cultivé, des solides laitiers cultivés, du lait écrémé en poudre et de l'acide lactique similaires à la poudre traditionnelle de yaourt (**Childs et Drake, 2008**).

L'objectif principal de la fabrication de poudre de yaourt est de stocker le produit dans un état stable et facilement utilisable, et il peut être utilisé pour remplacer le yaourt frais pour boisson et trempette, et dans l'industrie de confiserie comme revêtement pour les fruits secs, noix, bretzels, céréales et autres collations (**Childs et Drake, 2008 ; Krasaekoopt et Bhatia, 2012**).

Tableau n°8: Teneur moyenne des différentes variétés de yaourt pour 100g de produit
(**The Dairy Council, 2013**)

| Composants | Yaourt au lait entier | Yaourt à faible teneur en MG | Yaourt sans gras | Yaourt style grec | Yaourt à boire |
|--------------------|-----------------------|------------------------------|------------------|-------------------|----------------|
| Energie (Kcal) | 79 | 56 | 54 | 133 | 62 |
| Protéines (g) | 5,7 | 4,8 | 5,4 | 5,7 | 3,1 |
| Carbohydrates (g) | 7,8 | 7,4 | 8,2 | 4,8 | 13,1 |
| Matière grasse (g) | 3,0 | 1,0 | 0,2 | 10,2 | Trace |
| Thiamine (mg) | 0,06 | 0,12 | 0,04 | 0,12 | 0,03 |
| Riboflavine (mg) | 0,27 | 0,22 | 0,29 | 0,13 | 0,16 |
| Niacine (mg) | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Vitamine B6 (mg) | 0,1 | 0,01 | 0,07 | 0,01 | 0,05 |
| Vitamine B12 (mg) | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Folate (µg) | 18 | 18 | 8 | 6 | 12 |

| | | | | | |
|----------------|------|-------|-------|-------|-------|
| Carotène (µg) | 21 | trace | Trace | Trace | Trace |
| Vitamine D | 0 | 0.1 | Trace | 0.1 | Trace |
| Potassium (mg) | 2,80 | 228 | 247 | 184 | 130 |
| Calcium (mg) | 200 | 162 | 160 | 126 | 100 |
| Phosphore (mg) | 170 | 143 | 151 | 138 | 81 |

II.6.4 Classification selon les types de yaourt

Les yaourts peuvent être divisés en un certain nombre de types basés sur le fait que comment sont-ils faits. Seuls les types de yaourt les plus populaires disponibles sur le marché sont décrits dans cette section.

✓ **Yaourt de style balkan**

Le yaourt de style balkanique est également connu sous le nom de yaourt à la mode qui a une texture épaisse caractéristique et est fabriqué en petits lots individuels après avoir versé le mélange de culture chaud dans des récipients en incubant sans agitation pendant plus de 12 heures jusqu'à l'épaisseur désirée (**Dairy Goodness, 2013 ; Yogurt Page, 2012**).

✓ **Yaourt à la grecque**

Ceci est également connu sous le nom de yaourt de style méditerranéen fait à partir de lait partiellement condensé ou en colorant le lactosérum du yaourt nature pour le rendre plus épais et plus crémeux. En raison de sa texture épaisse, il a tendance à mieux résister à la chaleur que le yaourt ordinaire et sert donc d'ingrédient principal dans la fabrication de trempettes épaisses comme le tzatziki (**Yogurt Page, 2012 ; Dairy Goodness, 2013b**). Bien qu'il soit un produit délicieux, il a prétendu avoir une grande quantité de graisse, y compris une teneur élevée en graisses saturées. Cependant, il est susceptible d'être une source riche en vitamine A, car 150g de la portion fournira un cinquième de l'apport quotidien recommandé en vitamine A (**Dowden, 2013**).

✓ **Yaourt de style européen / yaourt brassé**

Le yaourt de style européen est un type de yaourt brassé avec une texture crémeuse et lisse caractéristique. Il est fait en incubant le mélange de yaourt dans une grande cuve au lieu de pots individuels, ce mélange est refroidi puis remué pour obtenir une texture crémeuse le plus souvent des fruits sont ajoutés (bleuets, fraises, mangues et pêches) et des saveurs (**Yogurt Page, 2012**). Les yaourts de ce style sont légèrement plus minces que ceux des yaourts au style des Balkans et peuvent être incorporés dans les boissons froides et les desserts.

✓ **Yaourt de style français**

Ce style de yaourt est également connu sous le nom de yaourt à la crème pâtissière fait par culture directe dans le pot selon une culture et un processus français qui se caractérisent par une texture de pudding. Parfois, les yaourts à la française sont aromatisés avec des morceaux de fruits qui se mélangent au mélange, le plus souvent avec des fraises et des bleuets ou un mélange des deux. Il est considéré comme une source idéale de fer, de protéines et de vitamine A (**Yogurt Page, 2012 ; Dowden, 2013**).

✓ **Yaourt aux fruits**

Il existe deux sortes de yaourt aux fruits: l'un a les fruits au fond de l'emballage (yaourt de style sundae) et l'autre les fruits sont uniformément distribués dans le yaourt lui-même (yaourt à la suisse) (**Yogurt Page, 2012**). Des morceaux de fruits ou de la pulpe sont ajoutés au stade de la production qui donne une variété de goûts tout en augmentant l'attrait et la douceur du consommateur.

✓ **Yaourt à boire**

Il est de consistance plus liquide et mousseuse. Ce yaourt est fabriqué à partir de lait fermenté additionné de sucre et de fruits ou de sirop à saveur de fruits. Il subit ensuite un procédé d'homogénéisation pour en réduire la viscosité puis il est mis en bouteille. Il est important de noter que ce produit est traité à ultra-haute température (UHT), ce qui inactive les bactéries et fait disparaître les bienfaits de la fermentation. Mais ils sont définitivement meilleurs qu'une boisson aux fruits ou gazeuse (**Daily Australia, 2013**).

II.7 Les bienfaits du yaourt

◆ Mis à part sa valeur nutritionnelle très intéressante, le yaourt contient un minimum de 10 millions de ferments par gramme de produit. Les études scientifiques ont montré que ces ferments confèrent au yaourt des effets sur la santé : à ce titre, ils font partie des ferments appelés « probiotiques» (**OMS, 2003**). La consommation régulière de yaourt est ainsi reconnue pour améliorer la digestion et l'absorption du lactose (**EFSA, 2010**). D'autres études récentes suggèrent des bénéfices sur le traitement des diarrhées des enfants ainsi que sur la stimulation du système immunitaire de certaines personnes immunodéprimées, tout particulièrement les personnes âgées (**Guarner et al., 2005**).

◆ La synthèse de la lactase, l'enzyme qui digère le lactose, a tendance à décliner avec l'âge. Ce phénomène physiologique naturel est d'ordre génétique et n'est pas une pathologie. En France, 20

à 50% des adultes ne conservent que 10% de la capacité qu'ils avaient à digérer le lactose étant nourrisson. Certains sont atteints de symptômes désagréables (ballonnements, flatulences, douleurs abdominales, ...) après l'ingestion d'une quantité plus ou moins grande de lait ; on parle d'intolérance au lactose. Ces personnes ont tendance à limiter leur consommation de lait et produits laitiers. Elles risquent de ne pas couvrir correctement leur besoin en calcium.

Or, parce que les ferments lactiques des yaourts sont vivants et actifs tout au long du transit digestif, leur capacité à digérer le lactose profite à l'organisme. Non seulement la consommation de yaourt ne cause aucune difficulté digestive aux personnes qui digèrent mal le lactose, mais elle leur est recommandée pour pouvoir bénéficier de tous les avantages nutritionnels du lait. Ce bénéfice des ferments du yaourt a été confirmé dernièrement par un avis positif de l'EFSA (autorité européenne de sécurité des aliments) rendu le 19 octobre 2010 (EFSA, 2010). : « Les ferments vivants du yaourt, dans le yaourt, améliorent la digestion du lactose chez les personnes qui le digèrent mal ».

◆ Dans les années 1950, des micro-organismes ont été commercialisés pour leurs bénéfices sur la santé dans des préparations pharmaceutiques à base de levures. Depuis, plusieurs études scientifiques ont suggéré que certains laits fermentés diminuent la fréquence et la durée des épisodes de diarrhées aiguës chez les enfants. L'Organisation mondiale de la Santé (OMS) recommande la consommation de yaourt au cours du traitement de certaines diarrhées aiguës (**Décret N° 88-1203 du 30 décembre 1988 relatif aux laits fermentés et au yaourt ou yoghourt**).



Chapitre III : Matériel et méthodes

III. Matériel et méthodes

III.1 Matières biologiques

III.1.1 Les graines de lin

Les graines de lin achetées dans un supermarché local à Alger ont été tamisées (taille des mailles 1 mm) afin d'éliminer toutes les impuretés et le gravier. Ces graines sont stockées à température ambiante et à l'abri de la lumière, dans des bocaux en verre. Avant chaque analyse, un broyage est effectué à l'aide d'un broyeur de type Universal Mill M20 IKA IMLAB. La chambre de broyage à double paroi est munie d'un raccord de refroidissement.

III.1.2 Laits en poudres

Pour la préparation des yaourts nous avons utilisé deux types de poudre de lait : la poudre de lait entier du commerce (28% MG) et la poudre de lait écrémée (0% MG) récupérée de la laiterie de Boudouaou.

III.1.3 Les ferments lactiques

Les ferments lactiques spécifiques au yaourt sont *Streptococcus thermophilus* et *Lactobacillus bulgaricus* à l'état surgelé, récupérés de l'industrie laitière DANONE.

III.2 Caractérisation physicochimique de la poudre de graines de lin (PGL)

Les analyses ont été réalisées au sein du laboratoire de l'agroalimentaire du CRAPC (Centre de Recherche Technique et Scientifique en Analyses Physico-Chimiques) et dans le laboratoire de Technologies Douces, Valorisation, Physico-chimie des Matériaux Biologiques, et Biodiversité du Département de Biologie, Faculté des Sciences, Université M'Hamed Bougara de Boumerdès.

III.2.1 Observations colorimétrique et microscopique de la PGL

III.2.1.1 Colorimétrie

Principe

Un lecteur de couleur (COLOR READER CR10, KONICA MINOLTA) a été utilisé pour mesurer la couleur de la poudre. Cette dernière est un attribut perceptif, subjectif, élaboré dans notre

système visuel à partir de la lumière renvoyée par les objets et leur environnement. La colorimétrie consiste en un ensemble de données et de méthodes permettant de quantifier la couleur objectivement. L'espace chromatique $L^*a^*b^*$ a été défini par la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE). Les trois coordonnées sont des correspondances de la balance (blanc-noir) L^* , de la balance « rouge -vert » a^* et de la balance « jaune - bleu » b^* (**Figure n°11**).

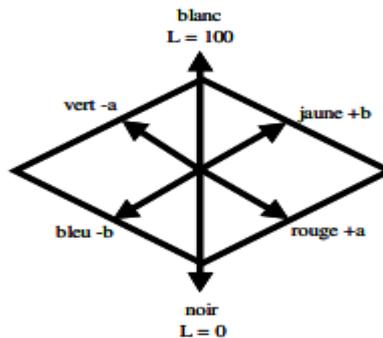


Figure n° 11:Schéma de l'espace chromatique CIE : $L^*a^*b^*$.

Mode opératoire

La mesure est effectuée sur des échantillons de poudre répartis dans des boîtes de Pétri transparentes. La cellule de l'appareil est directement appliquée sur la boîte de Pétri contenant la poudre pour effectuer la mesure. L'analyse a été répétée 3 fois.

Les paramètres de la couleur, L^* , a^* et b^* sont affichés sur l'écran du colorimètre.

III.2.1.2 Etude de la microstructure par le MEB

La microscopie électronique est une méthode d'observation qui utilise un faisceau d'électrons de haute énergie électronique. Elle doit son invention aux limites d'observation de la microscopie classique optique (agrandissement de x500 ou x1000 avec des résolutions de l'ordre du 0,2 μm). C'est donc la nécessité d'observer des microorganismes à des grossissements de l'ordre de 10.000x qui a favorisé l'apparition du ME dans les années 1930.

Le premier type de ME à être utilisé fut un MET (Microscope Electronique à Transmission) mis au point par Max Knoll et Ernest Ruska en 1931. Le premier MEB (Microscope Electronique à Balayage) apparut en 1942 et fut commercialisé en 1965 (**Bouchard-Abouchacra, 2001**).

Le MEB permet d'obtenir des images de surfaces de pratiquement tous les matériaux solides, à des échelles allant de celle de la loupe (x10) à celle du microscope électronique en

transmission(x500.000 ou plus). Ces images frappent en premier par le rendu très parlant du relief et la grande profondeur de champ(Faerber, 2004).

Principe de fonctionnement

L'image est formée de manière séquentielle en balayant la surface de l'échantillon par un faisceau d'électrons. Le MEB fournit des images de la surface en relation avec le mode de diffusion des électrons par l'échantillon. Le nombre d'électrons secondaires et rétrodiffusés émis varie en fonction du point d'impact du faisceau d'électrons sur la surface.

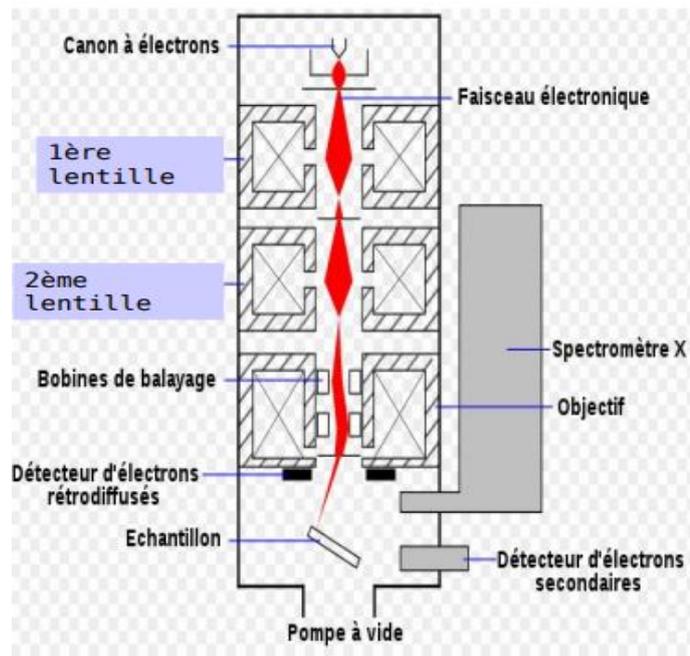


Figure n°12 : Schéma d'un MEB

Ces électrons sont détectés par des détecteurs. Une image est obtenue en relation avec l'intensité du courant électrique produit en chaque point de la surface (figure n°12). La topographie de l'échantillon est ainsi obtenue (Bortoluzzi et al., 2012).L'analyse est effectuée directement sur la poudre de graines de lin grâce à un MEB-EDX Quanta 250 à filament de tungstène.

III.2.2 Répartition granulométrique

La distribution granulométrique de la PGL a été déterminée par la granulométrie laser. Dans le but de fixer la taille des particules de la poudre à incorporer dans le yaourt, un tamisage de PGL a été effectué.

A/ le tamisage à sec

Le tamisage est l'une des plus anciennes méthodes d'analyse granulométrique et aussi l'une des plus largement utilisées lorsqu'il s'agit d'analyser la taille de particules supérieures à 45 µm, c'est en effet une technique peu coûteuse.

Principe

La technique consiste à diviser en fractions, à l'aide d'une colonne de tamis, la matière ou une partie adéquate de celle-ci constituant un échantillon parfaitement représentatif.

Mode opératoire

L'analyse est réalisée par un Rotachoc Chopin qui est constitué d'un empilement de tamis, dont la taille des mailles des tamis choisis est de 450, 355, 250 et 180 µm.

- La PGL est homogénéisée afin d'obtenir un échantillon représentatif ;
- 100g d'échantillon sont placés dans le tamis du haut de la pile ;
- la vitesse de rotation est réglée à 50 Hz.

Une fois le tamisage terminé, les différentes fractions obtenues sont récupérées, le choix de la granulométrie de la PGL est déterminé visuellement.

B/ Granulométrie par diffraction laser

Principe

Dans une mesure par diffraction laser, un faisceau laser passe à travers un échantillon de particules dispersées et l'intensité de la lumière diffusée est mesurée en fonction de l'angle. Les grosses particules diffractent de la lumière aux petits angles et les petites particules diffractent de faibles intensités aux grands angles (figure n°13).

Les intensités diffractées sont ensuite analysées pour calculer la taille des particules en utilisant la théorie de diffusion de Mie. La taille des particules représente le diamètre de la sphère équivalente ayant même volume que la particule (**Malvern Panalytical**).

La distribution de taille des particules est déterminée grâce à un granulomètre Malvern Mastersizer 2000 Ver. Version 4.00 (Malvern Instruments Ltd, UK). L'appareil est équipé d'un laser de type He/Ne d'une puissance de 5 mW et opérant à une longueur d'onde de 632,8 nm. L'optique est composée d'une cellule de mesure de 0,5 mm sur laquelle est montée une lentille de type 300RF possédant une distance focale de 0,45 mm.

L'intensité lumineuse diffusée par l'échantillon est récupérée par 42 photodiodes localisées à différents angles. La lumière étant diffusée par une particule avec un angle inversement proportionnel à sa taille, les grosses particules dévient une quantité importante de lumière avec des

angles faibles, alors qu'une petite particule va dévier des quantités faibles de lumières avec des angles plus importants.

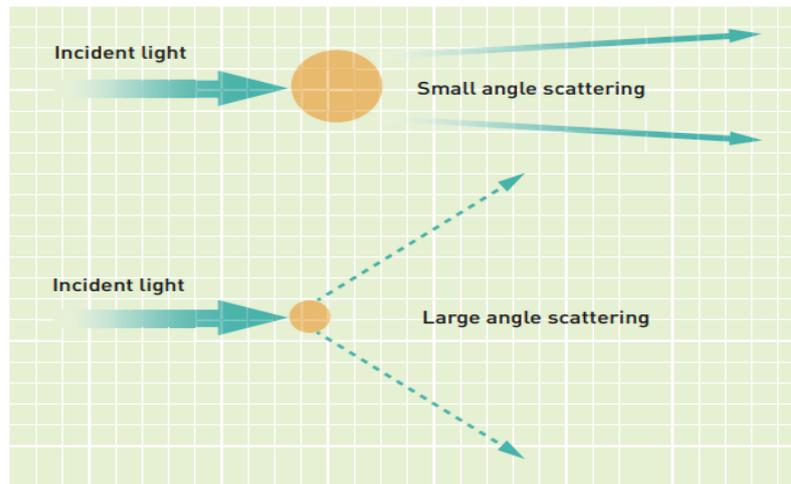


Figure n° 13: La diffraction de la lumière

L'acquisition est réalisée à l'aide du logiciel de traitement Malvern (Sizer Sv2.17) qui permet la récupération et l'analyse des données brutes.

Mode opératoire

La distribution de la taille des particules dans l'air est mesurée à l'aide d'un module spécifique aux poudres : dry powder feeder. La taille des particules détectées par ce système varie de 4,88 à 3473 μm .

Le logiciel du granulomètre intègre le modèle mathématique basé sur la théorie de la diffusion de Mie. Il prend en considération l'ensemble des phénomènes optiques liés à la diffusion des particules (diffraction, réfraction, réflexion). Le calcul de l'image de diffusion dépendra dans ce cas non seulement de la distribution granulométrique théorique considérée, mais également de la nature du matériau diffusant, par l'intermédiaire de ses propriétés optiques (Michel et Courard, 2006) :

$$m = n - ik$$

Avec :

m : l'indice de réfraction complexe ;

n : la partie réelle de l'indice de réfraction ;

k : la partie complexe de l'indice de réfraction, appelée indice d'absorption

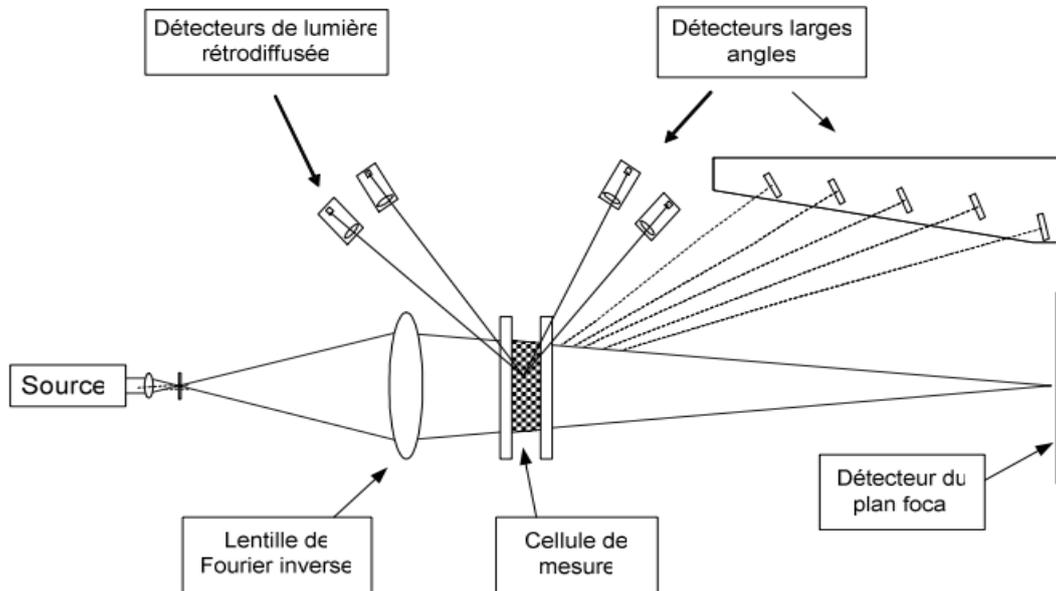


Figure n° 14 : Schéma simplifié de l'unité optique d'un granulomètre laser (Michel et Courard, 2006)

III.2.3 Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

Principe

La diffraction des rayons X sur monocristal permet d'étudier les structures cristallines. La diffraction à travers les poudres est principalement utilisée pour l'identification de phases. C'est une méthode non destructive utilisée pour l'analyse qualitative et quantitative d'échantillons polycristallins. Cette technique est basée sur les interactions de la structure cristalline d'un échantillon avec des radiations de courte longueur d'onde (Serna et al., 2014).

Mode opératoire

La mesure est réalisée sur 1 g de poudre sous vide à l'aide d'un diffractomètre de la nouvelle gamme D8 Advance A 25 de la marque BRUKER dans les conditions suivantes: $V = 40 \text{ kV}$, $I = 40 \text{ mA}$ et $\text{IK} \alpha \text{Cu} = 1.5406 \text{ \AA}$. L'enregistrement du diffractogramme (intensité diffractée en fonction de l'angle 2θ entre 3 et 70°) permet de déterminer les raies spécifiques de l'échantillon.

III.2.4 Analyse des éléments minéraux par la fluorescence du rayon X (FRX)

La Fluorescence du rayon X (FRX) est une technique physique très puissante pour l'analyse chimique. Elle se base sur les émissions de radiations caractéristiques des éléments chimiques lorsque ces derniers sont soumis à des radiations de rayons-X de haute énergie.

Les applications les plus courantes sont aussi bien qualitatives (tout matériau solide, tous les éléments à partir du Na) que quantitatives. Elle permet d'identifier les éléments majeurs et mineurs du type : Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti, Mn, Fe, ou les éléments traces (sur pastilles), exemples : Ni, Zn, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Sn, Cs, Ba, La, Ce, Hf, W, Pb, Th, U.

La FRX utilise des phénomènes de la physique quantique (effet photoélectrique, émission spontanée, diffraction des rayons X). Elle permet de mesurer des échantillons très variés tel que les minéraux et les métaux. Chacun des éléments présents dans un échantillon produit un ensemble de rayons X fluorescents caractéristiques qui est unique pour cet élément spécifique, ce qui explique pourquoi la spectroscopie FRX est particulièrement utile pour l'analyse élémentaire.

Cette « empreinte digitale » élémentaire est mieux illustrée en examinant le spectre d'énergie des rayons X et ses « pics de diffusion ». La plupart des atomes ont plusieurs orbitales d'électrons (coquille K, coquille L, coquille M, par exemple). Lorsque l'énergie des rayons X provoque le transfert des électrons à l'intérieur et à l'extérieur de ces niveaux, des pics FRX d'intensité variable sont créés et seront présents dans le spectre. L'énergie de pointe identifie l'élément, et la hauteur / intensité du pic est généralement indicative de sa concentration (Nummi, 2015).

Cependant, cette méthode reste une détermination élémentaire et ne fournit pas de composition minérale exacte de l'échantillon analysé. Le Spectromètre de Fluorescence des Rayons X utilisé est de type « ZSX Primus II de Rigaku ».

III.2.5 Analyse thermogravimétrique (ATG)

L'analyse thermogravimétrique est l'une des techniques permettant d'évaluer la perte de masse (transformation de phase lorsque le matériau se décompose, se déshydrate ou s'oxyde) en fonction de la température. L'analyse est effectuée à l'aide d'un calorimètre d'analyse thermique simultanée ATD/ATG/DSCSDT Q600 de la compagnie TA Instruments de précision 0.01 %. Les conditions expérimentales sont:

-masse = 11.5860 g, sous atmosphère d'azote,

-vitesse de chauffage :10°C /min pour une température allant de l'ambiante à 1000 °C

III.2.6 Teneur en eau et en matières volatiles (AFNOR T 03 903, 1966)

Principe

Le principe est basé sur la dessiccation du produit à une température voisine de 103 °C, dans une étuve isotherme et à la pression atmosphérique jusqu'à une masse pratiquement constante.

Mode opératoire

-Sécher des capsules en porcelaine vides à l'étuve durant 15 mn à 103 ± 2 °C ;

-Tarer les capsules après refroidissement dans un dessiccateur ;

-Peser dans chaque capsule 5g d'échantillon préalablement broyé et le placer dans une étuve réglée à 103 ± 2 °C pendant 3 heures ;

-Retirer les capsules de l'étuve, les placer dans le dessiccateur et après refroidissement, les peser. L'opération est répétée jusqu'à l'obtention d'un poids constant (en réduisant la durée de séchage à 30 mn) pour éviter la caramélisation.

Expression des résultats

$$H\% = \frac{M1 - M2}{p} \times 100$$

Soit :

H% : Humidité.

M1: Masse de la capsule + matière fraîche avant séchage en g.

M2: Masse de l'ensemble après séchage en g.

P: Masse de la prise d'essai en g.

$$\text{Matière sèche \%} = 100 - H \%$$

III.2.7 Détermination du pH (NF V 05-108, 1970)

Le potentiel d'hydrogène (pH) est une des variables utilisées pour caractériser les propriétés des milieux. Le pH est utilisé dans de nombreux domaines comme variable opératoire pour la caractérisation du produit fini ou encore à des fins de contrôle de qualité. De nombreuses études se

sont attachées à corrélérer sa valeur à des lois cinétiques de réactions, des qualités organoleptiques de produits ou encore des activités enzymatiques (Akin, 2008).

Principe

La mesure du pH est basée sur la détermination en unité de pH de la différence de potentiel existant entre deux électrodes en verre plongées dans une solution aqueuse de farine de lin.

Mode opératoire

- Placer la PGL dans un bécher et y ajouter trois fois son volume d'eau distillée ;
- Chauffer au bain-marie pendant 30 mn en remuant de temps en temps avec une baguette de verre;
- procéder à la détermination du pH en prenant soin que l'électrode soit complètement immergée dans la solution. Cette mesure a été réalisée à l'aide d'un pH-mètre électronique (pH 210 Hanna Instruments HI 2210).

III.2.8 Détermination de l'acidité titrable (NF V 05-101, 1974)

Principe

L'analyse est basée sur le titrage de l'acidité d'une solution aqueuse de PGL avec une solution d'hydroxyde de sodium en présence de phénolphthaléine comme indicateur.

Mode opératoire

- Peser 25 g \pm 0.01 de PGL ;
- Placer l'échantillon dans une fiole conique avec 50 ml d'eau distillée chaude récemment bouillie et refroidie, puis mélanger jusqu'à l'obtention d'un liquide homogène ;
- Adapter un réfrigérant à reflux à la fiole conique puis chauffer le contenu au bain-marie pendant 30 mn jusqu'à l'ébullition ;
- Refroidir, transvaser quantitativement le contenu de la fiole conique dans une fiole jaugée de 250 ml et compléter jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée récemment bouillie et refroidi, bien mélanger puis filtrer ;
- Prélever à la pipette 25 ml du filtrat et les verser dans un bêcher ;

-Ajouter quelques gouttes de phénolphtaléine et tout en agitant, titrer avec de la solution d'hydroxyde de sodium 0,1 N jusqu'à l'obtention d'une couleur rose persistante pendant 30 secondes.

Expression des résultats

L'acidité titrable est exprimée en grammes d'acide lactique pour 100 g de produit:

$$A \% = \frac{(250 \times V \times 100)}{V_0 \times M \times 10} \times 0.07 = 175 \frac{V_1}{V_0 \times M}$$

avec :

A % : acidité titrable ;

M : masse en grammes de produit prélevé ;

V0 : volume en millilitres de la prise d'essai ;

V1 : volume en millilitres de la solution d'hydroxyde de sodium à 0.1 N utilisé ;

0.07 : facteur de conversion de l'acidité titrable en équivalent d'acide citrique.

Le résultat final est exprimé en degré Dornic (°D).

III.2.9 Détermination de la teneur en lipides totaux(NF EN ISO 734-1)

Principe

Les corps gras sont les substances organiques qui peuvent être extraites à partir des fruits par des solvants organiques non polaires au moyen de l'appareil Soxhlet.

Mode opératoire

- Sécher le ballon de 500 ml à l'étuve à 105 °C pendant une heure;
- refroidir le ballon au dessiccateur pendant 30 mn ;
- peser le ballon à la précision de 0.001g ;
- peser 20 g environ de PGL ;
- introduire le broyat dans la cartouche de soxhlet ;
- placer la cartouche avec la prise d'essai à l'intérieur de l'appareil Soxhlet ;

- verser 200 ml de l'éther de pétrole dans le ballon et 50 ml dans l'extracteur ;
- chauffer le ballon sur le chauffe ballon pendant 6 heures (20 siphonages par heure) jusqu'à l'épuisement de la matière grasse ;
- après, éliminer le solvant du ballon au rotavapeur ;
- sécher le résidu du ballon dans une étuve à 70-80 °C ;
- refroidir le ballon au dessiccateur pendant 30 mn ;
- peser le ballon avec l'huile à la précision de 0.001g ;
- répéter l'opération de séchage jusqu'à l'obtention d'un poids constant du ballon.

Expression des résultats

La teneur en matière grasse est déterminée selon la formule suivante :

$$MG\% = \frac{(P2-P1)}{P3} \times 100$$

avec :

P2 : poids du ballon avec l'huile extraite (g).

P1 : poids du ballon vide (g).

P3: poids de la prise d'essai (g).

III.2.10 Détermination de la teneur en protéines (Méthode dekjeldhal) (NF-V 03-050, 1970)

Principe

Cette méthode, qui est la méthode de référence, consiste à effectuer une minéralisation complète des molécules organiques, transformant l'azote présent en ammoniacque qui peut être dosé par différentes techniques. Les échantillons sont minéralisés en présence d'acide sulfurique concentré et chaud (250° C). Le carbone, l'oxygène et l'hydrogène sont transformés en gaz carbonique et en vapeur d'eau, alors que l'azote reste en solution sous forme de sulfate d'ammonium C'est l'étape de ***minéralisation***. L'adjonction d'acide perchlorique ou d'eau oxygénée permet une minéralisation plus poussée (**Krameet al.,1973**).

Des catalyseurs doivent être rajoutés au milieu réactionnel (Sélénium, sels de mercure ou de cuivre, le sulfate de cuivre est le catalyseur retenu par la FIL). Les sulfates de potassium ou de fer élèvent le point d'ébullition. L'ammoniacque est obtenue par alcalinisation du milieu(**Guillou et**

al.,1986).L'ammoniac est déplacé de son sel par la soude, distillé par entraînement à la vapeur d'eau et recueilli dans une quantité connue d'acide chlorhydrique en excès. C'est l'étape de *redistillation*. La quantité d'acide chlorhydrique n'ayant pas réagi est dosée en retour par de la soude. C'est l'étape de **dosage**. Le protocole de dosage des protéines est décrit dans l'**Annexe 1**.

III.2.11 Détermination de la teneur en sucres totaux (Méthode de phénol : Dubois)

Principe

Le dosage des sucres repose sur la réaction suivante : l'acide sulfurique concentré provoque, à chaud, le départ de plusieurs molécules d'eau à partir des oses. Cette déshydratation s'accompagne par la formation d'un hydroxy-méthylfurfural(HMF) dans le cas d'hexose et d'un furfural dans le cas d'un pentose. Ces composés se condensent avec le phénol pour donner des complexes colorés (jaune-orangé). L'intensité de la coloration est proportionnelle à la concentration des oses. La densité optique est mesurée à 488 nm à l'aide d'un spectrophotomètre. Le protocole de dosage des sucres est décrit dans l'**Annexe2**.

III.2.12 Détermination de la teneur en cendres (NF V05-113, 1972)

Principe

Les échantillons sont calcinés à 550 °C dans un four à moufle jusqu'à obtention d'une cendre blanchâtre de poids constant.

Mode opératoire

- Dans des capsules en porcelaine, peser 2 g de PGL ;
- placer les capsules dans un four à moufle réglé à 550 ± 15 °C pendant 5 heures jusqu'à obtention d'une couleur grise, claire ou blanchâtre ;
- retirer les capsules du four et les mettre à refroidir dans le dessiccateur, puis les peser.

Expression des résultats

$$MO\% = \frac{(M1 - M2)}{P} \times 100$$

avec:

MO%: matière organique.

M1: masse des capsules + prise d'essai

M2: masse des capsules + cendres.

P: masse de la prise d'essai.

La teneur en cendres (Cd) est calculée comme suit :

$$\text{Cd} = 100 - \text{MO}\%$$

III.2.13 Détermination de la teneur en éléments minéraux

Les éléments minéraux sont dosés par Spectrophotométrie d'Absorption Atomique.

Principe

En absorption atomique la concentration est déduite de la mesure de l'absorption de la lumière par les atomes de l'élément resté à l'état fondamental lorsqu'ils sont éclairés par une source lumineuse convenable. La mesure de l'intensité lumineuse est faite à une longueur d'onde spécifique de l'élément à doser.

Mode opératoire

Pour la digestion nous avons utilisés des conteneurs de chambre en téflon doublés avec récipient en Polytétrafluoroéthylène (PTFE) personnalisable pour le réacteur d'autoclave de synthèse hydrothermale (200ml).

-Dissoudre 13 mg de cendres dans 7ml d'acide nitrique HNO_3 à 65% ;

- ajouter 3ml de peroxyde d'hydrogène H_2O_2 à 30% ;

-placer les chambres de digestion dans l'étuve à 110°C pendant 2h

-après digestion, transvaser la solution dans une fiole jaugée de 100 ml, puis compléter à 100 ml avec de l'eau ultra pure.

A partir de cette solution, nous avons effectué le dosage des éléments minéraux suivants : potassium, calcium, sodium, magnésium, zinc, fer, cuivre et manganèse, plomb et cadmium.

III.2.14 Détermination de la teneur en polyphénols totaux

III.2.14.1 extraction des polyphénols

Les polyphénols (PP), classe de molécules plutôt hydrosolubles, sont majoritairement extraits par des solvants de polarité moyenne à forte. Ainsi, pour notre étude, un mélange de solvants : méthanol/eau (80/20, v/v) a été retenu.

Extraction des polyphénols avec délipidation

Dans le protocole d'extraction de PP, une étape préliminaire de délipidation de matrices riches en matières grasses a été jugée cruciale par plusieurs auteurs notamment pour les graines de lin (**Harris et Haggerty, 1993 ; Kozłowska et al.,1983**) et les fruits de palmier (**Béreau et al.,2001**).

La poudre de graines de lin (10 g) est dégraissée initialement avec 30 ml d'hexane, placée dans le bain à ultrasons pendant 10 minutes à 130 kHz, et filtrée sur papier cellulose. Le marc récupéré est délipidé deux fois.

Pendant l'étape d'extraction, certaines précautions ont été prises afin de protéger les polyphénols et d'autres biomolécules particulièrement sensibles à toute dégradation éventuelle, en particulier en les protégeant de la lumière. De ce fait, chaque ballon d'extraction a été entièrement recouvert d'une feuille d'aluminium.

L'extraction des polyphénols à partir de la PGL délipidée est réalisée par macération hydro alcoolique. Les polyphénols sont extraits à partir de $10 \pm 0,1$ g de PGL, par macération dans 50 ml d'un mélange méthanol/eau (80:20, v/v). La macération a lieu à 50°C dans un bain marie, la vitesse de rotation est fixée à 150 rpm, au terme de 90 min de macération. Après filtration sur un tissu mousseline, les filtrats sont centrifugés pendant 10 min à 4000 rpm à température ambiante puis filtrés sur papier filtre N°1 (**Rombaut, 2013**).

La fin de l'extraction est marquée par l'évaporation à sec des surnageants réunis à l'aide d'un évaporateur rotatif pour le solvant organique à 40°C, suivie d'une lyophilisation pour le solvant aqueux. L'extrait sec est ensuite redissout dans le solvant d'extraction à la concentration souhaitée.

Les polyphénols étant surtout sensibles à l'oxydation et à la température, tous les échantillons ont été conservés à basse température, et à l'abri de la lumière avant chaque analyse.

III.2.14.2 Dosage des polyphénols totaux (PPT)

Principe

La teneur en composés phénoliques de l'extrait de graines de lin a été estimée par la méthode de Folin-Ciocalteu décrite par le Journal de la Société japonaise pour la science et la technologie de l'alimentation (2006). Cette méthode est basée sur la réduction en milieu alcalin de la mixture

phosphotungstique (WO_4^{2-}) phosphomolybdique (MoO_4^{2-}) du réactif de Folin-Ciocalteu par les groupements oxydables des composés phénoliques. Cette réduction conduit à la formation d'un produit de couleur bleue qui présente un spectre d'absorption à 765 nm dont l'intensité est proportionnelle à la quantité de polyphénols présents dans l'échantillon (**Macheix et al., 2005**).

Mode opératoire

Un volume de 0,1 ml de l'échantillon dilué a été ajouté à 1,6 ml d'eau distillée avant d'ajouter 0,1 ml de liquide de Folin-Ciocalteu et 0,2 ml de $NaCO_3$ à 20%. Le mélange a été homogénéisé à l'aide d'un agitateur électrique et laissé réagir à l'obscurité pendant 30 minutes. L'absorbance du mélange a été mesurée à 760 nm, trois fois à l'aide d'un spectromètre UV / VIS (SPECORD Plus UV lumière visible d'Analytik Jena).

Une droite d'étalonnage a été établie au préalable avec l'acide gallique dans une fourchette de concentrations comprise entre 10 et 100 $\mu g/ml$ (**Annexe 3**).

La teneur en polyphénols totaux de la PGL est exprimée en milligramme d'équivalent acide gallique par 100 grammes d'échantillon (mg EAG/100g).

III.2.15 Test de piégeage du radical libre DPPH•

Le composé chimique 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle (DPPH•) fut l'un des premiers radicaux libres utilisés pour étudier la relation structure activité antioxydant des composés phénoliques (**Blois, 1958 ; Brand-Williams et al., 1995**).

Principe

La réduction du radical DPPH par un antioxydant peut être suivie par spectrophotométrie UV visible, en mesurant la diminution de l'absorbance à 517nm provoquée par la présence des extraits phénoliques (**Molyneuxs, 2004**).

Le DPPH est initialement violet, en présence de composés anti-radicalaires, il est réduit et change de couleur en virant au jaune. Les absorbances mesurées à 517 nm servent à calculer le pourcentage d'inhibition du radical DPPH, qui est proportionnel au pouvoir antiradicalaire de l'échantillon (**Parejo et al., 2002**).

Mode opératoire

La capacité de piégeage des radicaux libres d'extraits de graines de lin dégraissées a été déterminée par spectrophotométrie, en suivant la procédure modifiée décrite par **Hatano et al. (1988)**. Une solution de DPPH 0,25 mM fraîchement préparée a été utilisée pour l'analyse. 2 ml

de solution de DPPH violet a été introduite à la micropipette dans un tube à essai, puis 0,5 à 3 mld'extrait d'échantillon sont ajoutés et remplis avec du méthanol pur jusqu'à 5 ml. Le mélange a été incubé dans l'obscurité pendant 30 min à température ambiante.

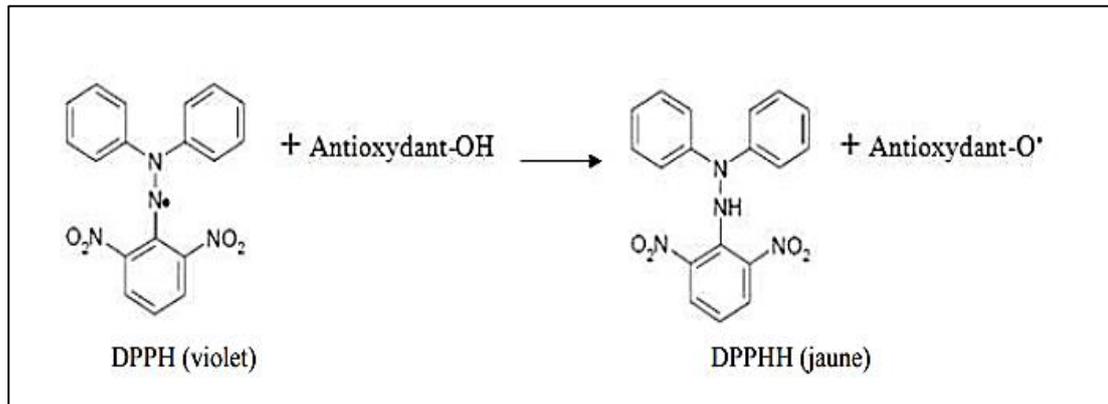


Figure n°15 :Piégeage du radical libre DPPH•(Congo, 2012).

L'absorbance a été mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre à 517 nm. Un mélange de 2 mL de solution de DPPH et de 3 mL de méthanol pur a été utilisé comme échantillon de contrôle. L'activité de balayage radicalaire a été calculée à l'aide de la formule suivante:

$$\text{Piégeage de radical DPPH [\%]} = [(A_0 - A) / A_0] 100$$

avec:

A_0 : absorbance de l'échantillon à blanc à $t = 30$ min

A : absorbance de l'extrait testé après 30 minutes d'incubation.

III.3Préparation du yaourt avec la PGL

La préparation des yaourts est réalisée à l'échelle de laboratoire en respectant le diagrammedefabricationd'un yaourtferme(**figure n°16**).Larecette de base adaptée pour les yaourts (Y1 et témoin), à la poudre de lait entier (PLE)estcelle déterminéaucoursd'untravailquientredansun projetde recherchebreveté(**Benamara et al.,2004**)avec quelques modifications.Pour le yaourt (Y2),à la poudre de lait écrémé(PLS) la recette utilisée est celle de **Sanz et al. (2008)**avec quelques modifications(tableau IX).

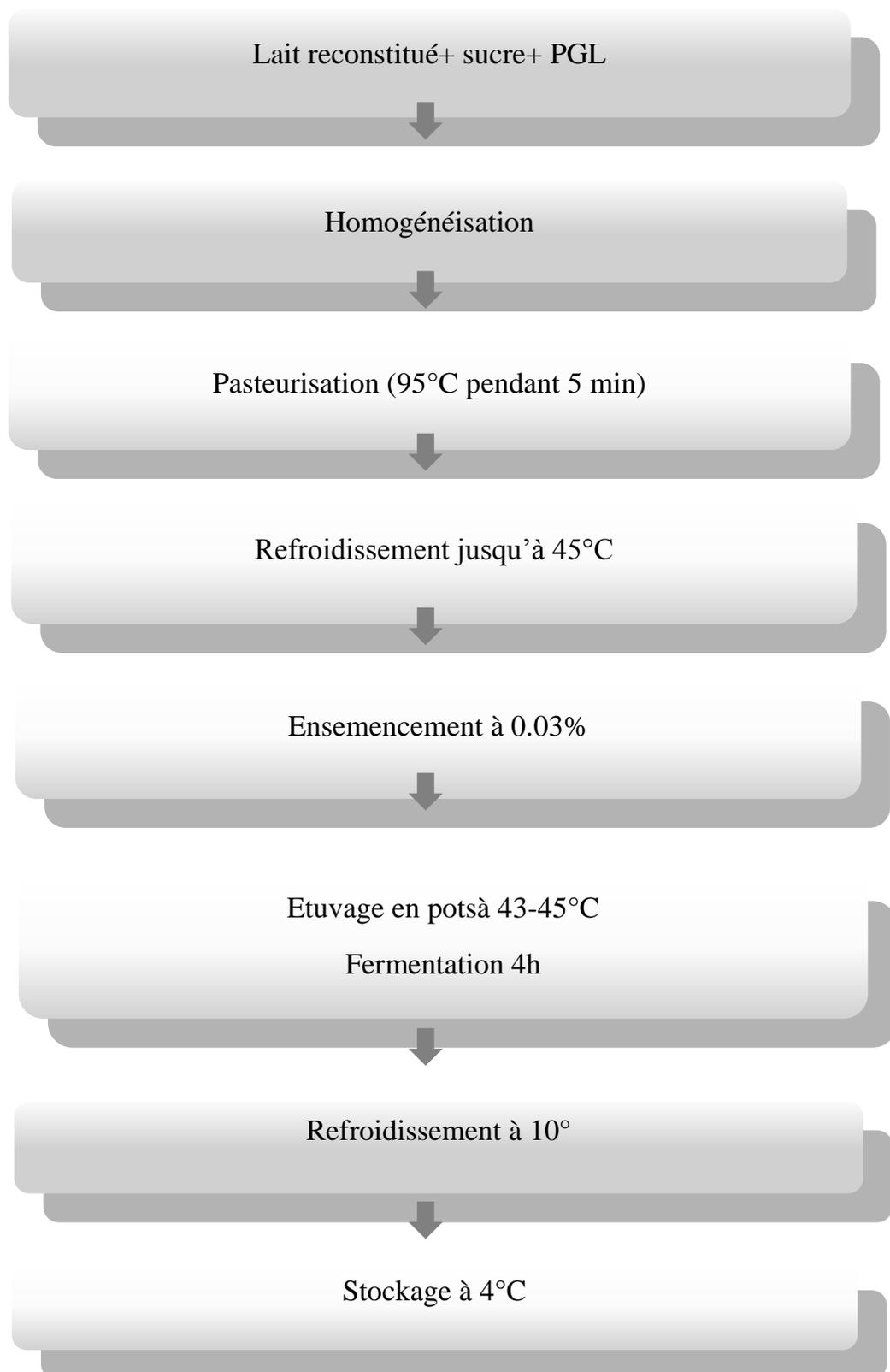


Figure n°16: Diagramme de fabrication de yaourt ferme à la PGL

Tableau IX: Recettes des yaourts aux graines de lin

| Recette | Poudre de lait (g) | Sucre (g) | PGL (g) | Eau (ml) | Ferments lactiques(%) |
|---------|--------------------|-----------|---------|----------|-----------------------|
| Témoin | 13,7 | 12,5 | 0 | 100 | 0,03 |
| Y1 | 13,7 | 12,5 | 3 | 100 | 0,03 |
| Y2 | 15 | 12,5 | 3 | 100 | 0,03 |

Trois lots de lait reconstitué ont été préparés. La quantité de poudre de graines de lin (PGL) ajoutée, (3%), est le résultat d'une analyse sensorielle préliminaire, la taille des particules de la poudre a été fixée à 450 µm et 250 µm. La période d'incubation a été déterminée en fonction du pH, au bout de 4h les trois types de yaourt se sont gélifiés (pH <4.6). Les échantillons sont refroidis à 10°C puis stockés à 4°C dans un réfrigérateur pour évaluer les propriétés physico-chimiques, structurales, microbiologiques et sensorielles à 0, 7, 14, 21 et 28 jours de stockage réfrigéré. Chaque lot de yaourt a été préparé en triple.

III.4 Caractérisation physico-chimique structurale et organoleptique des yaourts

Les mêmes protocoles utilisés pour la caractérisation physico-chimique de la PGL sont adoptés pour déterminer : la teneur en eau, la teneur en protéines, la teneur en sucre et la teneur en cendres et la teneur en minéraux des yaourts.

III.4.1 Détermination du pH

Le pH a été déterminé directement sur le yaourt en utilisant un pH mètre électronique du laboratoire type (pH 210 Hanna Instruments HI 2210).

III.4.2 La détermination de l'acidité titrable

L'acidité titrable des yaourts a été déterminée selon la norme (IDF / ISO / AOAC, 1991). Selon laquelle, 10g de yaourt avec quelques gouttes de phénolphthaléine sont titrés avec une solution de NaOH (0.1N). Elle est exprimée en grammes d'acide lactique pour 100 g de produit et est définie

par l'équation suivante:

$$At = \frac{V \times 0.9}{M}$$

avec:

At: acidité titrable ;

V :volume (ml) de l'hydroxyde sodium à 0.1N ;

M: masse de l'échantillon (g);

0.9: facteur de conversion de l'acide lactique.

Toutes les mesures ont été effectuées en triple.

Les résultats sont exprimés en degré Dornic (°D).

III.4.3 Dosage de la matière grasse(AFNOR, 1985)

La teneur en matière grasse est déterminée par la méthode acido-butyrique de Gerber.

Principe

Cette méthode est basée sur la dissolution des éléments autres que la matière grasse par de l'acide sulfurique, l'addition d'une petite quantité d'alcool iso-amylique aide la séparation de la matière grasse. La centrifugation permet la séparation des phases grasse et aqueuses.

Mode opératoire

- Dans un butyromètre mettre 10 ml d'acide sulfurique,ajouter 11 ml de yaourt puis 1 ml d'alcool amylique et quelques gouttes d'eau (pour faciliter la lecture) et enfin boucher le butyromètre à l'aide d'un bouchon sec ;
- agiter avec des tournements et placer le butyromètre dans la centrifugeuse en parallèle avec le tube d'équilibrage.
- La centrifugation est réalisée à une vitesse de 1200 rpm à 68°C pendant 10min.
- Retirer le butyromètre et lire le résultat.

III.4.5 La synérèse

Elle peut être mesurée au bout de 24 h après la formation des gels(**Guzman-Gonzalez et al.,1999**).100g de yaourt ont été pesés sur un papier filtre (Whatmann^o4) reposant sur un entonnoir relié à un ballon volumétrique. Après 2 heures de drainage à 4 ° C, le volume de lactosérum recueilli dans un cylindre gradué de 50 mL a été utilisé comme indice de synérèse(**Farooqet Haque, 1992**).

III.4.6 Analyse sensorielle

Les paramètres de l'analyse sensorielle (couleur, texture, goût et odeur) des yaourts ont été évalués par 10 dégustateurs (membres du Laboratoire de Technologie Douce, Valorisation, Physico-Chimie des Matériaux Biologiques et Biodiversité), 3 hommes et 7 femmes âgés de 20 à 50 ans, recrutés en fonction de leur motivation et de leur disponibilité pour participer à l'étude. L'analyse est effectuée à température ambiante, les échantillons de yaourt (10 g) ont été servis par ordre aléatoire dans des bocaux en verre transparents codés. Les dégustateurs ont été invités à noter leur préférence pour l'acceptabilité en utilisant des fiches de dégustation. Trois échantillons codés ont été fournis aux panels en même temps. L'acceptation du consommateur a été déterminée à l'aide d'une échelle de 5 points (**Amellal, 2008**):

- 1 point: produit non standard impropre à la consommation ;
- 2 points: produit de qualité insatisfaisante mais utilisable ;
- 3 points: produit de qualité satisfaisante ;
- 4 points: produit de bonne qualité ;
- 5 points: produit d'excellente qualité.

Les résultats de l'analyse sensorielle sont représentés par un graphique très adapté, il s'agit du graphique radar. Il permet de mettre en évidence les données autour d'une valeur de référence. Plus la donnée est éloignée de l'épicentre, meilleure en sera l'interprétation. Plus elle s'en rapproche, plus elle va attirer l'attention. Cette représentation sous forme de répartition de valeurs, offrent rapidement une vue explicite sur les points forts et points faibles.

III.4.7 Analyse microbiologique

Les analyses microbiologiques ont pour but de vérifier la qualité hygiénique et commerciale des yaourts préparés.

III.4.7.1 Cinétique décroissance des ferments lactiques

Un autre but a été visé dans l'analyse microbiologique, il s'agit de l'étude de l'influence de la supplémentation du yaourt par la PGL sur la cinétique de croissance des ferments lactiques.

Pour le dénombrement sélectif des *S. Thermophilus*, nous avons utilisé le milieu de culture M17 alors que le milieu MRS (agar de Man, Rogosa, Sharpe) a été utilisé pour *L. bulgaricus*. Les boîtes de Pétri ont été incubées sous conditions anaérobies à 37 ° C pendant 48 h et à 37 ° C pendant 72 h, respectivement (**IDF/ISO Standard 117:2003b**). Les colonies ont été comptées seulement dans les boîtes contenant entre 30 et 300 colonies (**Bonnefoy et al., 2002 ; Lim et al., 2009**). Les

échantillons ont été analysés en triple. Le nombre de colonies est exprimé en UFC / ml selon la formule suivante

$$UFC/ml = \frac{n}{dv}$$

où:

UFC: unité formant une colonie ;

n: nombre de colonies ;

v: volume collecté ;

d: dilution.

Cette analyse a été effectuée sur le yaourt control et le yaourt Y1 (selon les résultats de l'analyse sensorielle).Le pH, l'acidité titrable et la cinétique de croissance des ferments lactiques ont été mesurées pendant la période de fermentation et celle de stockage à 4°C durant 28 jours à un intervalle de 7 jours.

III.4.7.2 Qualité hygiénique des yaourts

Le yaourt est un produit rapidement périssable, le contrôle microbiologique permet la détection de la flore pathogène et d'assurer par la suite au produit une bonne qualité générale sous l'angle organoleptique et une bonne conservation dans le temps (**Bourgeois, 1996**).

Le tableau X résume l'ensemble des germes recherchés dans le yaourt selon l'arrêté interministériel du 04 octobre 2016 (**JORA N°39**).Les méthodes de recherche et de dénombrement des germes pathogènes sont détaillées dans l'annexe n°4 selon le Journal Officiel De La République Algérienne.

Tableau X : Germes recherchés dans les yaourts (JORA N°39, 2016)

| Germes recherchés | Méthode |
|-------------------------------------|-----------------------|
| Enterobacteriaceae | NF ISO 21528-2 (2004) |
| Staphylocoques à coagulase +/-g | NA1198 |
| Salmonella /25g | NA ISO 6579 : (2002) |
| <i>Listeria monocytogenes</i> / 25g | AFNORV08.55 |

III.4.8 Etude de la microstructure des yaourts

La microstructure des gels de yaourt a été étudiée par le microscope électronique à balayage. Les échantillons sont conservés à -18°C pendant une nuit puis lyophilisés en utilisant un lyophilisateur type CHRIST ALPHA 2-4 LSC plus. La poudre lyophilisée est déposée sur un talon MEB en aluminium avec un ruban de carbone adhésif des deux côtés.

III.4.9 L'analyse de la texture et de l'aspect rhéologique

III.4.9.1 L'analyse de la texture

La texture est la manifestation sensorielle et fonctionnelle des propriétés structurelles et mécaniques des aliments, détectée par les sens de la vision, de l'ouïe, du toucher et de la kinesthésie. Cette définition a le mérite de réconcilier les deux grandes catégories de praticiens tournés soit vers l'analyse sensorielle, soit vers l'analyse instrumentale de cette caractéristique organoleptique (**Daniel et Roudot, 2007**).

Cependant, dans le cadre d'une analyse organoleptique se pose le problème de l'objectivité de la réponse reçue et de sa reproductibilité inhérentes au caractère sensoriel du problème posé.

L'analyse de texture instrumentale permet des mesures rapides, objectives et plus sensibles et reproductibles que le jugement sensoriel subjectif.

Elle propose des méthodes très proches de la rhéologie des solides, c'est-à-dire que les principaux tests correspondent à des écrasements, torsions, percements, extensions, etc. du produit testé. Dès lors, assez naturellement, les praticiens se sont tournés vers la terminologie physique existante dans ce domaine, qui est très éloignée de la terminologie en analyse sensorielle : on parle alors de caractéristiques mécaniques telles que coefficient d'élasticité, contrainte limite en compression, module d'Young (**GFR 1990**), et plus de fermeté, gluant ou croquant. Cette nouvelle terminologie a l'avantage d'être parfaitement et précisément définie, ce qui la rend apte à la communication scientifique.

La texture des yaourts a été déterminée en utilisant un analyseur de texture (TA Plus, LLOYD instruments, Angleterre), contrôlé par le logiciel NEXYGEN. La mesure de la fermeté du gel a été effectuée sur les échantillons de yaourt en pots conservés à 4°C pendant 10 jours, en utilisant un mobile de forme cylindrique de 12 mm de diamètre. La base du mobile a été minutieusement placée sur la surface du pot de yaourt, le mobile a été déplacé jusqu'à une profondeur de 20 mm avec une vitesse de 1 mm/seconde. La fermeté (force du gel en N) est définie comme étant la force nécessaire pour atteindre la profondeur maximale.



Figure n° 17:Photo du texturomètre

La prise en masse lors de la fermentation du yaourt formulé entraîne la formation d'un gel dont la résistance est mesurée à partir de déplacement de ce mobile lequel pénètre dans le pot de yaourt sans l'agiter à différentes distances (de 1mm jusqu'à 20mm).

Les paramètres suivants sont mesurés :

- La force du gel ou de rupture, qui permet d'évaluer la consistance du gel (fermeté du gel) ;
- La distance de rupture indiquant la rigidité du gel ;
- La force à une distance de pénétration donnée (15 mm en général) (**Luquet et Carrieu, 2005**) ;
- L'inclinaison de la courbe de pénétration définie comme un indice (ou module) de rigidité du gel (**Fizman et al., 1999**).

L'analyse de pénétration est répétée trois fois pour chaque distance et pour chaque yaourt.

III.4.9.2 L'analyse rhéologique

La rhéologie est la science qui étudie la déformation et l'écoulement des corps sous l'influence de contraintes qui leur sont appliquées. On appelle *sollicitation* la force qui s'exerce sur un corps ; les *contraintes* sont les forces (F) s'exerçant sur un élément de surface *ds* rapporté à l'air de cet élément de surface ($\tau=F/ds$) ; on nomme *contrainte tangentielle* (shear stress...) la projection de la contrainte appliquée à un élément de surface sur le plan de cet élément de surface ; le terme de *déformation* s'applique à la modification des distances mutuelles de différents points d'un

corps ; la dérivée de la déformation par rapport au temps est appelée *vitesse de déformation*; lorsqu'elle agit en tangentielle, on parle souvent de *vitesse de cisaillement* (souvent notée γ et exprimée en s^{-1})(Stoltz, 2019).

La rhéologie permet d'étudier la relation entre la contrainte et la déformation (ou l'écoulement) d'un produit. La caractérisation de cette relation repose sur l'exploitation des résultats de tests expérimentaux plus ou moins complexes durant lesquels un échantillon de yaourt est soumis à une sollicitation (en effort/contrainte ou en déplacement), ce qui induit une réponse (en déplacement ou en effort/contrainte) qui est évaluée (GrossiordetCouarraze, 2000 ; Coussot et Grossiord, 2002).

Les procédés de préparation de produits (solutions, pâtes, fromages, yaourts, etc...) nécessitent impérativement l'écoulement de la matière, il est donc nécessaire de connaître le comportement de cette matière pour déterminer les forces à mettre en jeu.

Les tests de rhéologie ont été réalisés à l'aide d'un rhéomètre rotatif à contrainte imposée (AR2000 TA instrument) (Figure n°19). Il est équipé d'un module à cylindres coaxiaux (standard-size DIN) avec un rotor cylindrique : hauteur du cylindre d'immersion (42mm), diamètre du cylindre externe (14 mm), diamètre du cylindre interne (15 mm).

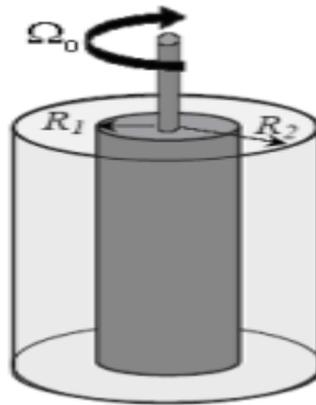


Figure n°18:Schéma des cylindres coaxiaux d'un rhéomètre

La contrainte de cisaillement est la grandeur dynamique fondamentale en rhéologie. Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, deux couches successives au contact l'une de l'autre se déplacent relativement l'une par rapport à l'autre. Il apparaît à l'interface de ces deux couches des forces de frottement qui s'exercent tangentiellement à la surface de la couche (Figure n°18). Le yaourt étant un fluide viscoélastique rhéofluidifiant, toute manipulation énergique modifie ses

propriétés rhéologiques. Un protocole fixé, établi lors de précédents travaux sur le yaourt (**Koskoy et Kilic, 2004**), a été appliqué pour la préparation des échantillons.

Les yaourts sont stockés avant l'analyse dans un réfrigérateur à 4 °C pendant 8 jours (**Cayotet al., 2003**). Afin d'homogénéiser le contenu et d'éliminer la présence éventuelle de sérum à la surface, chaque pot de yaourt a été délicatement mélangé trois fois de bas en haut à l'aide d'une petite cuillère, tout en tournant le pot de gauche à droite. La température des échantillons est ajustée à 10°C et est maintenue constante tout au long de l'analyse. L'échantillon de yaourt (10 ml) est placé dans l'espace entre le cylindre interne et le cylindre externe. Les échantillons sont restés dans le système pendant 10 à 15 min jusqu'à ce que la température se stabilise (10°C).

Les mesures rhéologiques sont effectuées par balayage en contrainte et sous régime harmonique. Une rampe de contraintes de cisaillement comprises entre 0.1 Pa et 100 Pa, avec une fréquence de 1 Hz a été exercée. La distribution des contraintes était logarithmique, avec un pas de 100.6 Pa (50 points). Un test à vitesse de cisaillement contrôlée a été également effectué afin de déterminer les courbes et le type d'écoulement des quatre yaourts.

La vitesse a été variée linéairement de 0 à 300 s⁻¹ pendant 5 min (courbe croissante), puis dans le sens inverse de 300 jusqu'à 0 s⁻¹ (courbe décroissante) pendant 5 min. Les résultats de la contrainte de cisaillement et de viscosité sont mesurés toutes les 6s. La viscosité dans la courbe d'écoulement correspondant à la vitesse de cisaillement de 50 s⁻¹ est prise comme viscosité apparente du yaourt. Cette valeur est prise comme étant la viscosité dans la bouche : la valeur de la vitesse de cisaillement en bouche est d'environ 50 s⁻¹ (**Bourne, 2002**). Un balayage en fréquence a été également exercé de 0,1 à 10 Hz.



Figure n° 19: Photographie du rhéomètre AR 2000

A partir des tests effectués (test d'écoulement, test dynamique), les paramètres suivants sont retenus pour caractériser le comportement rhéologique des yaourts :

- La viscosité apparente ;
- Le module de conservation ou module élastique G' ;
- Le module de perte ou module visqueux G'' ;
- L'angle Delta δ , (égale au ratio de G'' et G') ;
- K, indice de consistance (Pa.sn) ; n, indice d'écoulement (sans unité) ; τ , seuil d'écoulement (Pa) (paramètres du modèle d' Herschel Bulkley).

III.4.10 Analyse statistique

Toutes les analyses statistiques des yaourts ont été effectuées en utilisant SPSS version 21.0, IBM STATISTICS (USA). L'ANOVA était effectuée en utilisant la procédure des modèles linéaires généraux pour déterminer les différences significatives entre les échantillons.

Pour les analyses physico-chimiques et la texture des yaourts, les moyennes ont été comparées en utilisant le test de Duncan et le test HSD de Tukey. Pour la cinétique de croissance des ferments lactiques, comme nous avons deux échantillons, les moyennes ont été comparées en utilisant le test de Student et la signification a été définie au seuil 0.05.

Chapitre VI : Résultats et discussion

VI.1 Caractérisation physico-chimique de la poudre de graines de lin (PGL)

VI.1.1 Propriétés biochimiques

Au cours des deux dernières décennies, les graines de lin ont émergé comme des aliments fonctionnels importants et attractifs en raison de leur composition nutritive souhaitable. Le tableau XI présente la composition biochimique de la PGL. Les résultats montrent des niveaux adéquats en nutriments, confirmant la possibilité de l'utilisation de cette poudre comme produit diététique (Mueller *et al.*, 2010).

Tableau XI : La composition physicochimique de la poudre de graines de lin

| Composition biochimique | |
|----------------------------------|--------------|
| pH | 6,13±0,01 |
| Acidité titrable (°D) | 20,17±0,026 |
| Teneur en eau (% , ms) | 6,02±0,25 |
| Cendres (% , ms) | 3,53±0,095 |
| Sucres totaux (g/100g) | 1,3±0,12 |
| Lipides totaux (% , ms) | 39,89±0,51 |
| Protéines (%) | 15,12±03 |
| Polyphénols totaux (mg EAG/100g) | 462,93±42,61 |

- Le pH est un paramètre déterminant l'aptitude à la conservation des aliments. Il constitue l'un des principaux obstacles que la flore microbienne doit franchir pour assurer sa prolifération (Giddey, 1982 ; Gatel, 1982 ; Brissonet *et al.*, 1994). A retenir qu'un pH de l'ordre de 3 à 6 constitue un facteur très favorable au développement des levures et moisissures.

Les bactéries par contre, préfèrent des milieux neutres, en général des pH entre 7 et 7,5 avec pour la plupart des tolérances plus larges, dans une plage de pH allant de 6 à 9. Il en ressort que le pH de la PGL est légèrement acide.

▪ La teneur en eau de la PGL (6,02%) est inférieure à la valeur maximale (8%) spécifiée pour la graine de lin stockée (**Berglund et Zollinger, 2007**) empêchant la dégradation biologique due à une infection fongique. Cette faible teneur en eau est défavorable aux insectes et surtout aux acariens. Pour une bonne conservation sur une durée plus ou moins longue, il est recommandé de stabiliser les graines à des humidités comprises entre 7 et 8%, ce qui permet d'éviter leur acidification suite au développement d'insectes et de moisissures (**CETIOM, 2008**). Notre résultat se rapproche de celui trouvé par **Coskuner et Karababa, 2007** (6,1%). **Bozan et Temelli (2008)**, **Epaminondas et al. (2011)**, **Sargi et al. (2013)** et **Tuncel et al. (2017)** ont rapporté des valeurs légèrement supérieures qui sont respectivement 6.31, 6.52, 6.6 et 6.40%. **Mueller et al. (2010)** ont trouvé une teneur en humidité de 7,4 pour les graines de lin brunes. **Selvi et al. (2006)** et **Mousavi et al. (2019)** ont rapporté des valeurs supérieures à la valeur standard (8,3%) et (10.21%) respectivement.

▪ La teneur moyenne en cendres est de 3.53%, similaire à celle rapportée par **Tuncel et al. (2017)** (3.53%) et légèrement supérieure à celles trouvées par **Muir et Westcott (2003)** et **Mousavi et al. (2019)** (3,4%), (3.22%) respectivement, et inférieur à la valeur trouvée par **Oomah et Mazza (1998)** (4,8%).

▪ La teneur en sucres totaux est de 1.3g/100g de matière fraîche, cette valeur est inférieure à celles obtenues par **Rombaut (2013)** pour les variétés de graines de lin Baladin et Linoal avec un taux de 3.7% et 2.9% respectivement.

▪ Le taux de protéines dans les GL est compris entre 10,5% et 31% (**Oomah et Mazza, 1993**). La PGL utilisée dans notre expérimentation est composée de 15.12% de protéines.

Les cultivars Khategaon cultivés en Inde avaient une teneur en protéines de 21,9% (**Madhusudhan et Singh, 1985**). La différence dans les teneurs en protéines peut être attribuée à la fois à la génétique et à l'environnement. La valeur nutritionnelle et le profil en acides aminés des graines de lin sont comparables à celle des protéines de soja (**Madhusudan et Singh 1985; Oomah et Mazza 1993**). Les protéines de GL sont efficaces pour réduire le cholestérol et les triglycérides plasmatiques (TAG) comparativement aux protéines de soja et à la caséine (**Bhathena et al., 2002**). Ces protéines présentent des propriétés antifongiques contre *Alternariasolani*, *Candida albicans* et *Aspergillus flavus* (**Xu et al., 2008**). Le lin étant

exempt de gluten, les personnes sensibles au gluten peuvent en consommer sans crainte (Morris, 2003).

▪ L'intérêt croissant pour les GL est dû à leurs propriétés prébiotiques et bénéfiques pour la santé, notamment contre les maladies coronariennes, certains types de cancer, les maladies neurologiques et les troubles hormonaux (Huang et Milles, 1996; Huang et Ziboh, 2001; Simopoulos, 2002).

L'un des composants actifs des GL qui leur confèrent des propriétés fonctionnelles est l'huile de lin. C'est la source végétale la plus riche en acides gras polyinsaturés (AGPI) : acide linoléique (oméga-3) et acide linoléique (oméga-6) (Schuster et Friedt, 1998).

La teneur en matière grasse obtenue est de 39.89(%) (tableau XI), ce résultat est inférieur à ceux trouvés par Singh et al. (2012) et Pandurang et al. (2014) qui sont respectivement 42.21% et 40.5%. Rombaut (2013) a observé un taux de lipides de 39.2% pour la variété Linoal. La teneur en huile dépend des méthodes de culture et de l'aspect de la région productrice. Les constituants lipidiques insaponifiables des huiles des graines contiennent naturellement des hydrocarbures, des alcools terpéniques, des stérols, des tocophérols et d'autres composés phénoliques pouvant agir en tant qu'inhibiteurs de l'oxydation dans diverses conditions (Bosku et Morton, 1976). Ces matières ont prouvé leur efficacité dans le ralentissement de la dégradation de l'huile (Rady et Awatif, 1991; Awatif et al., 1996).

Dans les grains de lin, les lipides sont protégés contre l'oxydation par divers mécanismes, tels que la présence d'antioxydants : les lignanes, les phénols, les tocophérols (vitamine E) et les flavonoïdes (Kitts et al., 1999 ; Ahmed et al., 2005).

En plus de la prévention de la rancidité des graisses, ces antioxydants pourraient augmenter la valeur commerciale des produits alimentaires et avoir des effets bénéfiques sur la santé humaine. Lorsqu'ils sont consommés avec des acides gras essentiels non saturés, ils peuvent réduire le risque de diverses maladies (Romieu et Trenga, 2001).

▪ Les composés phénoliques sont des composés phytochimiques trouvés abondamment dans les céréales, les fruits, les légumes, les plantes médicinales et les déchets agricoles. Ils ont suscité un grand intérêt scientifique vu leurs propriétés pour la promotion de la santé (Thompson et al., 2005 ; Ardestani et Yazdanparast, 2007).

La teneur de la PGL en PPT a été déterminée par la méthode de Folin-Ciocalteu, d'après le tableau n°10, cette teneur est de 462.93mg/100g d'échantillon, ce résultat est largement inférieur à celui trouvé par Anwar et Przybylski (2012) avec une valeur de 2020 mg GAE /

100g pour des extraits de lin à 80% de méthanol. **Kaur et al. (2017)** ont observé des teneurs plus faibles avec les variétés de GL, Jeevan et Baneer, qui sont respectivement 85.24 et 82.9 µg/g. Idem pour **Rombaut (2013)**, qui a rapporté des teneurs en PPT de 0.33, 0.32 et 0.38 g/100g respectivement pour les variétés de GL, Astral, Baladin et Linoal **Deng et al. (2018)** ont trouvé des teneurs variant de 109.93 à 246.88 mg GAE/100 g pour différentes variétés de GL cultivées en Chine.

Cette variation dans la teneur en composés phénoliques peut être attribuée à plusieurs facteurs, tels que : la génétique, le type de cultivars (**Jing et al., 2007; Lopes da Silva et al., 2007**), le stress environnemental (sécheresse), les conditions agronomiques, la méthode de traitement et la méthode d'analyse (**Carter, 1993; Coskuner et Karababa, 2007**). Des mauvaises conditions de stockage peuvent causer une dégradation thermique de ces molécules thermosensibles.

Les composés phénoliques contenus dans les graines de lin peuvent servir d'agents de blocage ou de piégeage dans les cancers induits chimiquement par des cancérogènes aromatiques. Un apport continu de ces composés protecteurs peut servir de tampon contre les dommages cellulaires en complétant quantitativement et qualitativement les systèmes protecteurs endogènes (**Johnsson et al., 2002**).

VI.1.1.1 Activité antioxydante de la PGL

En raison de l'implication des radicaux libres (RLs) dans diverses pathologies, la recherche de nouvelles molécules, pouvant pallier le déficit du système de défense endogène, s'est largement intensifiée. Plusieurs méthodes ont été mises au point pour estimer le potentiel antioxydant de différents extraits de plantes. En général, ces méthodes mesurent la capacité des antioxydants (AO) à piéger des radicaux spécifiques, inhiber la peroxydation des lipides ou chélater des ions métalliques.

L'activité antioxydante des extraits phénoliques a été déterminée par la méthode de piégeage du radical libre DPPH. Il a été largement utilisé pour évaluer cette propriété dans les extraits de différentes plantes en raison de sa facilité d'utilisation et de sa stabilité (**Hung et al., 2011**).

Pour notre étude, le pouvoir scavenger de la PGL est de 83,63% (% d'inhibition), ce résultat se rapproche de celui trouvé par **Kaur et al. (2017)**, 85.57% pour la variété Himani de GL. **Anwar et Przybylski (2012)** ont rapporté une valeur de 81.3% pour les extraits de GL traités à 80% de méthanol.

La capacité de piégeage des radicaux libres des antioxydants est déterminée par leur capacité à donner un hydrogène au radical libre. Il a été signalé que les antioxydants contenant des motifs phénoliques dans leur structure sont très efficaces pour piéger les radicaux libres et que leur capacité de piégeage dépend de l'énergie de dissociation des liaisons entre l'oxygène et l'hydrogène phénolique (**Shahidi, 1997 ; Litwinienko et Ingold, 2003 ; Choe et Min, 2006**).

Des preuves disponibles ont confirmé que les acides phénoliques libres solubles constituaient plus de 50% des composés phénoliques totaux dans les graines de lin entières (**Deng et al., 2018**). Plus important encore, les acides phénoliques libres possèdent une activité antioxydante supérieure à celle des composés phénoliques à liaisons insolubles extraits de graine de lin entière (58% contre 7–21%) (**Alu'datt et al., 2013**). Par conséquent, les acides phénoliques libres pourraient fournir des contributions essentielles au système antioxydant endogène de la graine de lin (**Deng et al., 2018**).

Les bienfaits des lignanes de lin pour la santé résident dans leur capacité antioxydante. La capacité antioxydante de SDG est liée à la suppression des conditions oxydantes due aux espèces oxygénées. Le diglycoside du SDG et son aglycone, le secoisolariciresinol, ont un pouvoir antioxydant très élevé et agissent comme des protecteurs contre les dommages causés à l'ADN et aux liposomes lors du métabolisme des bactéries du côlon qui les transforment en lignanes de mammifère (**Hu et al., 2007**).

Dans une étude récente sur la relation potentielle entre la capacité antioxydante et les composants phénoliques spécifiques dans les variétés de lin. Une importante corrélation a été observée entre l'AAO et la teneur en acides phénoliques libres et le SDG, une corrélation directe a été obtenue entre le SDG et les acides phénoliques totaux ce qui indiquait que les lignanes et les acides phénoliques libres pouvaient coopérer pour constituer la matière de base du système antioxydant dans des échantillons sélectionnés de graines de lin (**Deng et al., 2018**).

Slavova kazakova et al. (2015) ont observé une corrélation relativement faible entre l'AAO et les composés phénoliques dans les échantillons de graines de lin ce qui confirme que ces composés étaient principalement présents sous forme de complexe macromoléculaire, une forme qui ne peut pas révéler une AAO efficace.

En raison de l'existence de glucosides dans le SECO et d'acides phénoliques dans les graines de lin, il serait plus efficace d'évaluer le potentiel antioxydant des extraits de GL avant et après une hydrolyse alcaline et acide (**Deng et al., 2018**).

Une teneur élevée en ALA a été considérée comme associée à une efficacité du système antioxydant endogène afin de maintenir l'intégrité de la graine (Barthet et al., 2014).

La quantité d'acides gras polyinsaturés influe grandement sur le taux d'oxydation; C18: 4 s'oxydera deux fois plus vite que C18: 3, qui s'oxydera environ 40 fois plus vite que C18: 1 (Frankel, 1998).

VI.1.1.2 Teneur en minéraux

La teneur en minéraux de la poudre de graines de lin est présentée dans la partie « yaourt ».

VI.1.2 Etude de la couleur

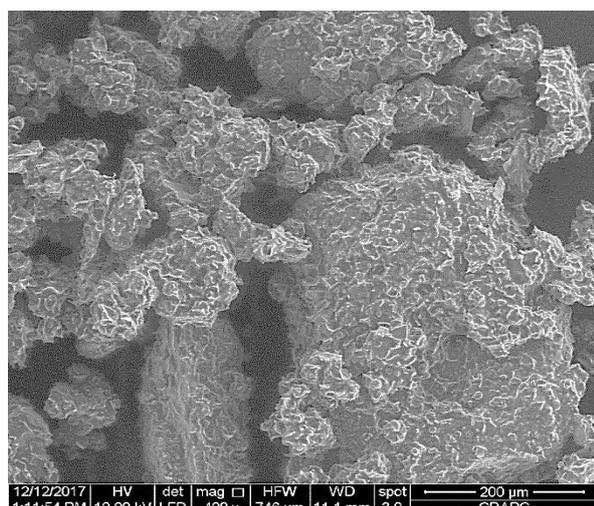
Tableau XII : Paramètres de la couleur de la poudre de Graines de lin

| PGL | L* | a* | b* |
|-----|-------------|------------|--------------|
| | 49,1 ± 0,87 | 9,6 ± 0,62 | 25,86 ± 0,32 |

Les indices de couleur de la PGL sont indiqués au niveau du tableau XII, les valeurs obtenues sont largement supérieures à celles trouvées par Tuncel et al. (2017) dans une étude comparative entre les GL à l'état brute et les GL grillées. Les composés phénoliques présents dans les graines oléagineuses sont considérés comme des composants responsables de la couleur, du goût et de la saveur des protéines (Sosulski, 1979).

VI.1.3 Etude de la microstructure par le MEB

La microscopie électronique à balayage fournit des informations de microstructure de la poudre des graines de lin.



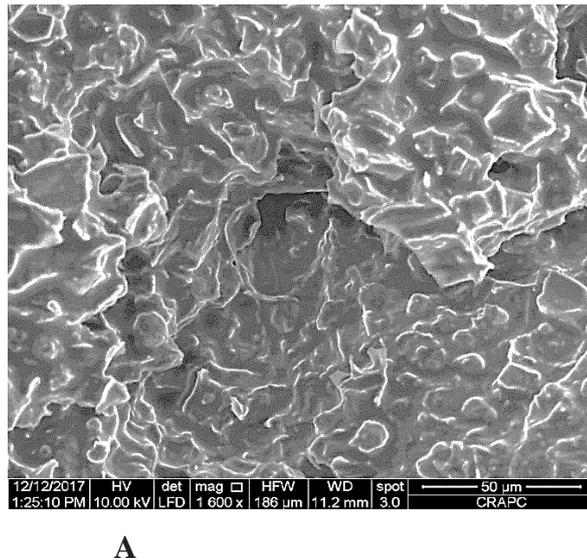


Figure n°11 : Micrographies de la PGL déterminée par le MEB

A(400x), B(1600x)

Les micrographies de la figure n°11 ont montré des granules de formes irrégulières et des zones caractérisées par une accumulation de grains formant des agrégats de formes variables et des lingots poreux. Cette configuration facilite la pénétration du liquide à l'intérieur des pores de la poudre. Ces résultats sont semblables à ceux obtenus par **Caparino et al. (2012)** et **Aksil (2015)** pour des travaux réalisés sur la poudre de mangue et la poudre du fruit de l'arbousier respectivement.

VI.1.4 Répartition granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométrique de la poudre de graines de lin par diffraction laser sont représentés sur la figure n°12. La poudre présente une distribution granulométrique multimodale ou hétérogène.

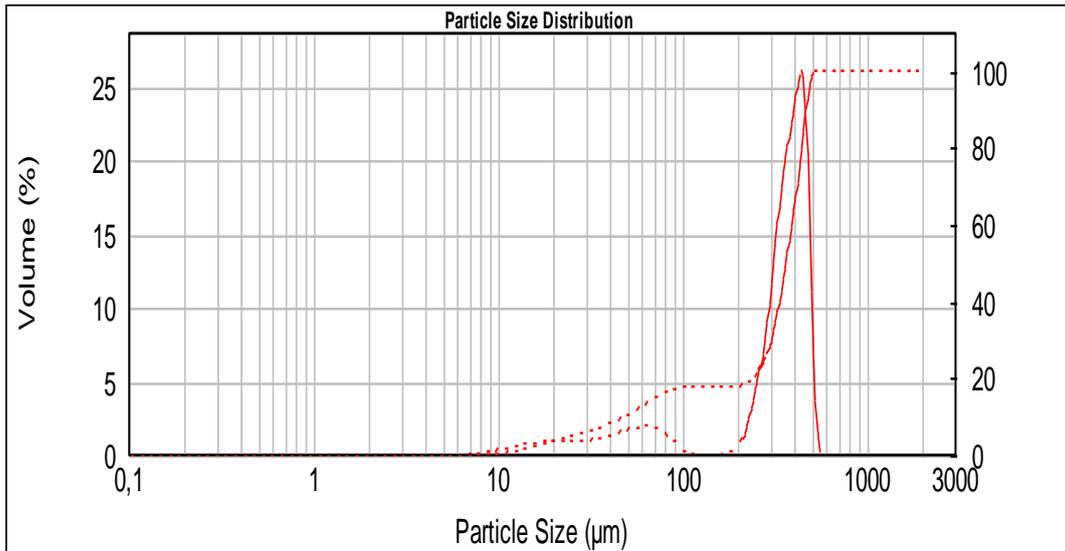


Figure n° 12: Distribution granulométrique de la poudre de graines de lin

Tableau XIII: Caractéristiques granulométrique de la PGL

| Paramètres | PGL |
|-------------------|---------|
| d (0.1) µm | 48,074 |
| d (0.5) µm | 361,730 |
| d (0.9) µm | 465,398 |
| Span | 1,154 |

d(0,1), d(0,5) et d(0,9) représentent la taille des particules pour laquelle 10, 50 et 90 % en volume de l'échantillon se trouve respectivement en-dessous des indiqués en µm ; Span (polydispersité) = $[d(0,9) - d(0,1)] / d(0,5)$.

La taille des particules varie de 7,586 µm à 549,541 µm avec une surface spécifique de 0.0485 m²/g. La forme en cloche de la courbe s'étale de 100 au 1000 µm, traduisant une distribution homogène des granules de la poudre dans cet intervalle. Les résultats de l'analyse granulométrique de la PGL sont résumés dans le tableau XIII.

VI.1.5 Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

Les résultats de l'analyse par diffraction des rayons X de la PGL sont représentés dans la figure n°13. Le diffractogramme montre la présence d'un seul pic large et l'absence totale des pics spécifiques, ceci est caractéristique de la structure amorphe. Par ailleurs, cette dernière est clairement signalée sur différentes poudres alimentaires séchées: la mangue

(Caparino et al., 2012 ; Aksil, 2015) et la gomme séchée de fruit d'*Abelmoschus esculentus* (Emeje et al., 2011).

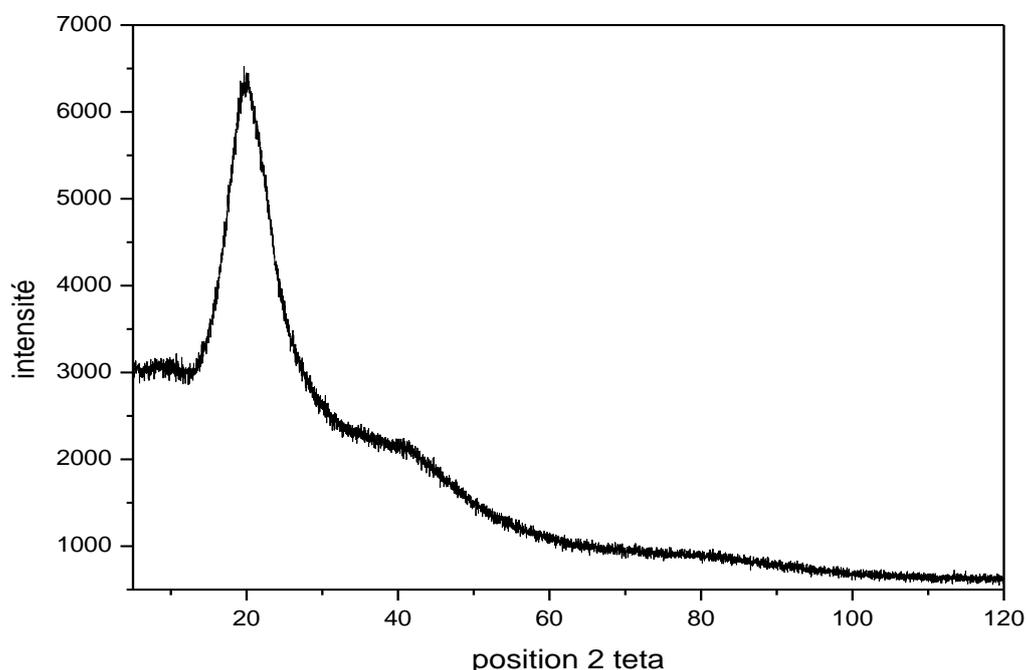


Figure n°13: Diffraction par rayons X de la PGL

VI.1.6 Analyse des éléments minéraux par la fluorescence du rayon X (FRX)

La spectrométrie de fluorescence X permet d'extraire toutes les formes de l'élément chimique que l'on veut doser, particulièrement celles intégrées dans les réseaux cristallins des minéraux primaires et secondaires silicatés.

Tableau XIV: Eléments minéraux présents dans la PGL déterminés par la fluorescence du rayon X (FRX)

| No | Elément | % massique | Oxydes |
|----|---------|------------|--------------------------------|
| 1 | Mg | 4,33 | MgO |
| 2 | Al | 0,0262 | Al ₂ O ₃ |
| 3 | Si | 3,27 | SiO ₂ |
| 4 | P | 7,06 | P ₂ O ₅ |
| 5 | S | 3,08 | SO ₃ |
| 6 | Cl | 0,28 | / |
| 7 | K | 48,6 | K ₂ O |
| 8 | Ca | 30,6 | CaO |

| | | | |
|----|----|--------|--------------------------------|
| 9 | Mn | 0,444 | MnO |
| 10 | Fe | 0,867 | Fe ₂ O ₃ |
| 11 | Ni | 0,0441 | NiO |
| 12 | Cu | 0,317 | CuO |
| 13 | Zn | 0,88 | ZnO |
| 14 | Br | 0,0968 | / |
| 15 | Rb | 0,0132 | Rb ₂ O |
| 16 | Sr | 0,0926 | SrO |

Les pourcentages massiques des minéraux (Mg, P, S, Cl, K et Ca) et des oligo-éléments (Al, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Si et Br) déterminés dans la PGL sont donnés dans le tableau XIV. Le macroélément majoritaire est le potassium avec un pourcentage massique de 48,6% suivis du calcium à 30.6% et du phosphore par la suite à 7,06%, ces résultats sont en désaccord avec ceux trouvés par **Narina et al. (2012)** dans une étude sur les graines de lin brun ou l'élément majoritaire était les sulfures avec un pourcentage massique de 3,42% suivi du magnésium à 0.9% et du potassium à 0.65%. Le même désaccord dans les pourcentages a été observé pour les micronutriments, ceci peut être expliqué par la différence variétale des graines de lin étudiées et par la composition matricielle totale de l'échantillon (**Pashkova, 2009**).

VI.1.7 Analyse thermogravimétrique (ATG)

Les pourcentages de perte en masse ainsi que la dérivée de la masse par rapport à la température sont représentés dans la figure n°12. L'examen de la courbe d'analyse montre l'existence de quatre étapes de perte en masse.

- La première étape de perte de masse est assignée à la déshydratation à une température comprise entre (50 et 150°C), avec des pertes de masse de 6,99%, cette valeur observée est en accord avec la teneur en eau déterminée par la méthode classique (Tableau n°10). Le maximum est enregistré sur le signal de la dérivée de la masse à 84.54°C. Selon la littérature, outre la déshydratation, différents événements endothermiques se produisent à la même température, tel que la gélatinisation de l'amidon et la dénaturation de certaines protéines (**Silva et al., 2004**). **Oomah et al. (2006)** dans une étude sur les caractéristiques thermiques des protéines isolées à partir de graines de lin, ont observé une dénaturation à des températures initiales variant de 85,7 à 97,1°C.

La deuxième étape de perte de masse (150-375°C) correspond au début de la perte de la valeur nutritionnelle de la graine de lin (Figure n° 14). Une séquence d'événements exothermique a été observée, comme indiqué dans les courbes, caractérisant le début de la combustion de la matière organique présente dans les graines. La perte de masse dans cette étape (40.05% à 375°C) peut être affectée à la combustion de glucides, au début de la décomposition de l'hémicellulose et de la cellulose, et à la dégradation des triglycérides,

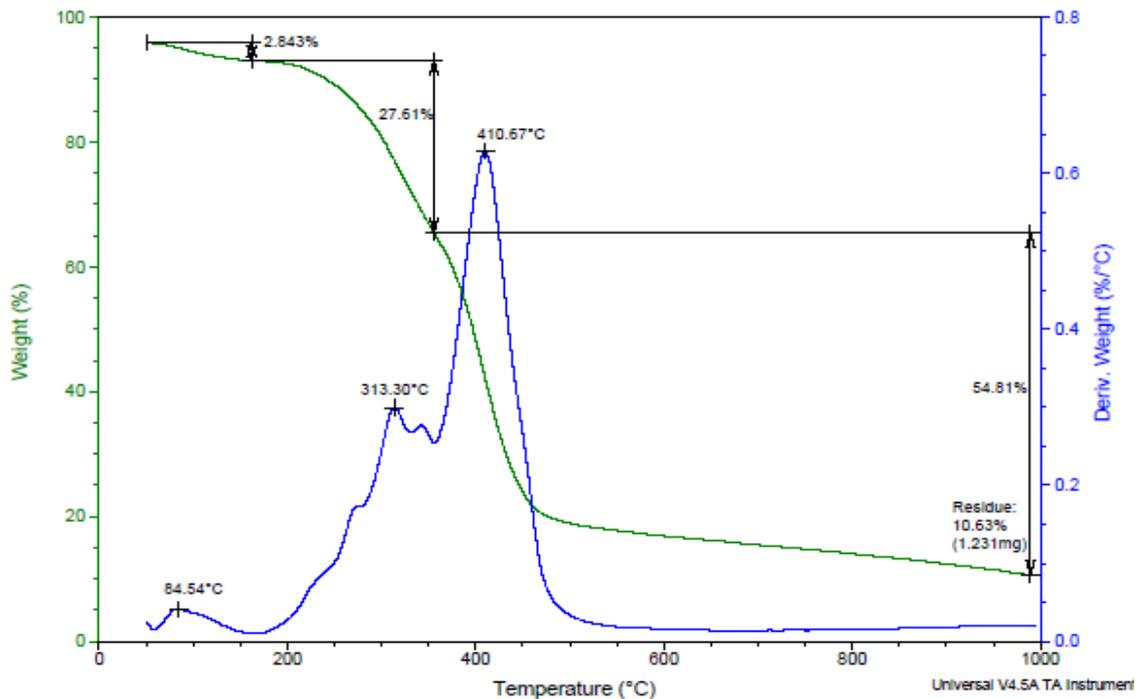


Figure n° 14 : Courbe d'analyse thermogravimétrique (ATG/DSC) de la PGL

comprenant l'oxydation des acides gras (Rudnik et al., 2001 ; Geneau-Sbartai et al., 2008). D'après le tableau n°10, il convient de noter que la perte de masse dans cette étape se rapproche de la concentration en lipides.

La troisième étape de la perte de masse (375-450°C) peut être assignée à la dégradation thermique des fibres, principalement la lignine (Epaminondas et al., 2011).

la quatrième étape (450-600°C) est attribuée à la dégradation des protéines. Selon la littérature, la stabilité thermique plus élevée des protéines par rapport à d'autres composés est due aux groupements fonctionnelles des protéines qui conduisent à des interactions ioniques et hydrophobes ainsi qu'aux liaisons hydrogène et liaisons disulfure ou aux interactions disulfure-sulfhydryl (SS-SH) (Rudnik et al., 2001 ; Geneau-Sbartai et al., 2008).

VI.2 Caractérisation physico-chimique, structurale et organoleptique des yaourts

VI.2.1 Propriétés biochimiques

D'après les résultats présentés au niveau du tableau XV, l'addition de la PGL a significativement influencé le taux de cendre et la teneur en sucres à ($p>0.05$). Cependant aucune différence significative n'a été enregistrée entre Y1 et Y2 pour l'extrait sec et la teneur en protéines. Les yaourts supplémentés de la PGL sont plus riches en matières minérales (cendres), en sucre et en protéines.

L'addition de la PGL a augmenté la teneur en matière grasse de 0.39% au niveau du yaourt Y1 par rapport au témoin ceci est dû à la richesse de cette poudre en lipide puisqu'il s'agit d'une poudre de graines oléagineuses, cette augmentation est statistiquement non significative. Contrairement au yaourt allégé Y2, la substitution de la poudre de lait entier par la poudre de lait écrémé a provoqué une diminution significative de la teneur en lipides de 2.23% par rapport au témoin. Plusieurs auteurs ont rapporté des concentrations différentes en gras des yaourts en fonction de la composition du lait et des matières additionnées, notamment **Rinaldoni et al. (2012)**, ont enregistré des teneurs en lipides entre 14.5g/l et 15.5 g/l pour des yaourts au lait de soja supplémentés d'inuline à différentes concentrations. Dans une étude sur des yaourts fortifiés de poudre de noisettes et de poudre de pistache, **Ozturkoglu-Budak et al. (2016)** ont signalé des teneurs en lipides de 5.8% et 5.6% respectivement contre 3.62% du témoin.

L'extrait sec (ES) des trois yaourts varie entre 22 et 26%, une richesse très importante en comparaison avec d'autres travaux sur des yaourts supplémentés, de dattes avec ES entre 13.04 et 21.39% (**Amellal, 2008**), de cantaloup avec ES entre 21.38 à 22.78% (**kermiche et al., 2018**) et d'inuline à 70g/l, avec ES de 21% (**Rinaldoni et al., 2012**).

Tableau XV : La composition biochimique des yaourts

| | Y1 | Y2 | Témoin |
|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Extrait sec (%) | 26,00±0,00 ^a | 25,33±1,15 ^a | 22,00±1,00 ^b |
| Taux de cendre (%) | 0,91±0,00 ^a | 0,98±0,00 ^b | 0,74±0,00 ^c |
| Teneur en sucres totaux (g/100g GL) | 7,07±0,04 ^a | 7,46±0,07 ^b | 6,73±0,02 ^c |
| Teneur en lipides totaux (%) | 3,88±0,29 ^a | 1,26±0,08 ^b | 3,49±0,08 ^a |
| Teneur en protéines (%) | 9,81±0,03 ^a | 9,12±0,28 ^a | 7,60±0,49 ^b |

Les valeurs avec des lettres différentes dans la même ligne diffèrent significativement ($p < 0,05$).

Suite à la supplémentation, la teneur en protéines a significativement augmenté de 2.21% et de 1.52% au niveau Y1 et Y2 respectivement par rapport au témoin. Les teneurs trouvés sont supérieures à celles enregistrées par **Ozturkoglu-Budak et al. (2016)**.

VI.2.1.1 Teneur en minéraux

Le tableau XVI, résume la composition en minéraux de la poudre de graines de lin et des yaourts. La poudre de graine de lin est riche en potassium, en magnésium et en calcium avec 662,67, 382,18 et 197,26 mg/100g respectivement. La supplémentation de cette poudre au yaourt a permis son enrichissement en tous les éléments minéraux étudiés.

La teneur en Ca est intimement liée à celle des anthocyanes, les sels de K donnent la couleur pourpre et les sels de Ca et de Mg la couleur bleue. De plus les acides phosphatiques (sans base azotées) peuvent se trouver dans les végétaux sous forme de sels de Ca, de Mg et de K. Il en est de même de la phytine, très répandue dans les végétaux et qui renferme du Ca et du Mg. (**Siboukeur, 1997**).

La teneur en Na de la PGL est de 26,81 mg/100g, en tant que cation abondant du liquide extra cellulaire, le Na influence fortement la distribution de l'eau par osmose, fait partie du système tampon bicarbonate de Na et joue un rôle dans la distribution des influx nerveux (**Jacot et Campillo, 2003 ; Tortora et Anagnostakos, 1987**).

D'après les résultats du tableau XVI, on remarque un enrichissement des yaourts Y1 et Y2 en minéraux par la suite de la supplémentation de la PGL, avec une augmentation non significative de la teneur en potassium à 78.14 mg/100g dans Y1 et à 81.86 mg/100g dans Y2 par rapport au témoin 62.78 mg/100g, et de la teneur en magnésium, à 23.22 mg/100g dans Y2 et à 24.96 mg/100g dans Y1 contre 15.59 mg/100g du témoin.

Une augmentation significative de la teneur en calcium a été observée dans Y1 à 259.40 mg/100g et dans Y2 à 293.90 mg/100g par rapport au témoin 197.42 mg/100g. Plusieurs auteurs ont rapporté des teneurs différentes en calcium des yaourts nature : (**Wang et Singh, 1978**) 1525 mg/Kg, (**Moreno-Rojas et al., 1993**) 1355mg/Kg, (**Buttriss, 1997**) 2000mg/Kg et (**Garcia-Martinez et al., 1998**) 1112mg/Kg. La richesse du yaourt nature en éléments minéraux varie en fonction de la composition de la poudre de lait utilisée. **Amellal (2008)** a signalé une teneur en calcium de 2938,67mg/Kg pour un yaourt naturellement sucré avec la poudre de datte de la variété Frezza.

Tableau XVI : Teneur moyenne en éléments minéraux dans la PGL et les yaourts en mg/100g

| Elément minéral | Teneur en (mg/100g) | | | |
|-----------------|---------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|
| | PGL | Y1 | Y2 | Témoin |
| K | 662,67±43,87 | 78,14±12,01 ^a | 81,86±8,59 ^a | 62,78±11,68 ^a |
| Mg | 382,18 ±19,86 | 24,96±2,52 ^a | 23,22±5,19 ^a | 15,59±5,33 ^a |
| Ca | 197,26±49,98 | 259,40±38,44 ^a | 293,90±6,76 ^a | 197,42±26,35 ^{ac} |
| Na | 26,81±6,63 | 98,55±11,16 ^a | 90,80±6,35 ^a | 67,42±6,91 ^b |
| Fe | 7,46±1,28 | 0,81±0,10 ^a | 0,71±0,09 ^a | 0,52±0,02 ^a |
| Cu | 4,35±1,38 | 0,16±0,09 ^a | 0,17±0,11 ^a | 0,03±0,04 ^a |
| Zn | 2,71±0,84 | 0,23±0,07 ^a | 0,26±0,11 ^a | 0,12±0,05 ^a |
| Mn | 2,5±0,7 | 0,09±0,02 ^a | 0,09±0,03 ^a | <0,03±0 ^b |
| Pb | <0,02±00 | <0,36±00 ^a | <0,37±00 ^a | 0,30±00 ^a |
| Cd | <0,02±00 | <0,36±00 ^a | <0,37±00 ^a | 0,30±00 ^a |

Les valeurs avec des lettres différentes dans la même ligne diffèrent significativement (p <0,05).

Les yaourts Y1 et Y2 sont plus riches en calcium, ce qui aide à renforcer les os et est particulièrement bénéfique pour les jeunes enfants afin de prévenir le rachitisme et les os fragiles chez les adultes. Il a également été démontré qu'un apport suffisant en calcium et en d'autres nutriments provenant de produits laitiers permettait de réduire le risque d'hypertension artérielle (**Miller et al., 2000**). Ces yaourts sont également plus riches en potassium, qui régule l'équilibre hydrique dans le corps et fournit les propriétés alcaloïdes appropriées aux liquides corporels. En outre, stimuler les reins à expulser les déchets corporels toxiques (**Lindinger, 1995**).

Pour ce qui est du Fe, Cu, et Zn, les teneurs ont augmenté d'une manière non significative par rapport au témoin. Le yaourt est une bonne source de protéines et de calcium (**USDA, 1982**) tandis que les produits laitiers sont pauvres en fer et en autres minéraux (**Blanc, 1981**). L'enrichissement en fer des produits laitiers contribue à atténuer les carences nutritionnelles. Le yaourt enrichi de fer a une biodisponibilité du fer relativement élevée (**Woestyne et al., 1991**).

Le zinc semble jouer un rôle précieux dans le processus de guérison et la stabilité du sang, ainsi que dans le maintien d'un équilibre alcalin adéquat dans le corps (**Hamrick et Counts, 2008**). Il est également nécessaire pour maintenir la fonction du système immunitaire propre, et stimule l'activité cérébrale normale comme il a un apport fondamental dans la croissance et le développement du fœtus (**Kupeli et al., 2014**).

Gad et al. (2010) ont rapporté des teneurs en K, Ca, Mg, Fe et Zn de 3744, 1700, 360, 10.8 et 17.8 mg/kg respectivement dans le yaourt enrichi en jus de dattes. Alors que **Abou Jaoude et al. (2010)** ont trouvé des concentrations en K, Na, Mg, Ca et Zn de 89, 199, 17, 94 et 1 mg/100g respectivement dans le yaourt au lait entier égoutté. **Ogori et al. (2017)** ont signalé des teneurs en Zn, Cu, Fe, Mg et Ca de 0.602, 0.3267, 2.25, 14.73, et 6.67 mg/L respectivement pour le yaourt à base de pulpe de fruits balanaites aegyptiaca prétraités.

En ce qui est du Pb et du Cd, les teneurs observées dans les trois yaourts sont presque identiques, <0.37mg/100g, cela nous permet de conclure que ces minéraux qui se trouvent à l'état de trace, proviennent essentiellement de la poudre de lait utilisée, puisque la PGL contient une quantité inférieure à 0.02mg/100g.

VI.2.2 Évolution de l'acidification du yaourt pendant la fermentation

L'évolution de l'acidification au cours de la période de fermentation des trois yaourts est représentée dans la figure n°15. L'ajout de 3% de PGL a augmenté le niveau d'acidification, par rapport au yaourt contrôle, cet effet s'est révélé statistiquement significatif ($p < 0,05$) après 1 h d'incubation. Ces résultats sont similaires à ceux trouvés par **Zare et al. (2011)** dans son étude sur le yaourt supplémenté de poudre de lentilles.

L'augmentation du taux d'acidification est l'un des principaux inconvénients de la fabrication du yaourt. Il est donc important d'atteindre un équilibre entre la force du gel ainsi que le temps de fermentation commercialement réalisable. Pendant la période de fermentation, la production d'acide lactique augmente avec la croissance des ferments *S. thermophilus* et *L. bulgaricus*.

Les valeurs de l'acidité titrable pour tous les échantillons étudiés ont augmenté pendant la durée de fermentation (Tableau XII). La diminution dans les valeurs de pH et, en parallèle, l'augmentation des valeurs de l'acidité titrable des échantillons sont en accord avec les résultats obtenus par **Pelaes Vital et al. (2015)** pour le yaourt enrichi avec l'extrait aqueux de *Pleurotus ostreatus*.

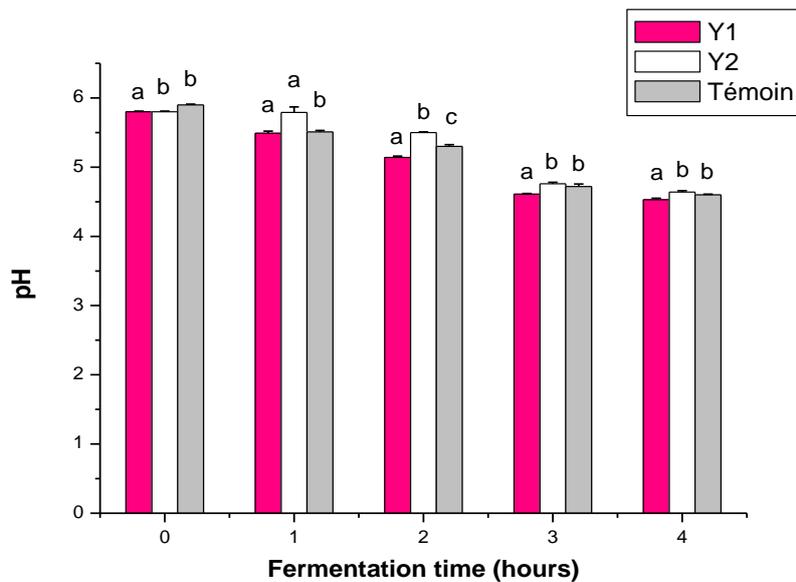


Figure n°15: Variation du pH en fonction de la durée de fermentation des yaourts.

Les barres avec les différentes lettres dans le même temps de fermentation diffèrent significativement ($p < 0,05$).

Le temps requis pour atteindre un pH inférieur ou égal à 4,6 était plus court dans le cas des yaourts supplémentés ceci est dû à la richesse des graines de lin en fibres alimentaires insolubles qui favorisent la croissance des ferments lactiques *S. thermophilus* et *L. bulgaricus* (Tableau XVII).

Avec les yaourts enrichi en PGL, nous avons constaté que la gélification complète était plus rapide précisément dans Y1; cela peut être expliqué par :

- en premier lieu : par la présence de fibres solubles, qui sont une gomme visqueuse composée de monosaccharides neutres (75%) et acides (25%) (Warrand et al., 2005), la gomme de lin possède une bonne capacité de gélification, de moussage et d'émulsification, et peut potentiellement remplacer la gomme arabique dans les émulsions alimentaires (Chen et al., 2006 ; Wang et al., 2010).

- en second lieu : par la matière grasse (Y1), qui joue un rôle important dans le contrôle de la fermeté / viscosité et de l'onctuosité perçue du yaourt, en raison de la formation d'un plus grand nombre de petites particules de graisse pendant l'homogénéisation, lorsqu'elles sont stabilisées par des protéines de lait et interagissent avec la matrice protéique (Folkenberg et Martens, 2003).

Tableau XVII: Variation de l'acidité titrable (°D) pendant la durée de fermentation du yaourt entier(Y1) et du yaourt allégé (Y2) supplémentés de PGL et le yaourt témoin

| Temps de fermentation (h) | Types de yaourt | Aciditétitrable (°D) |
|---------------------------|-----------------|------------------------|
| 0 | Y1 | 24 ± 4,35 ^a |
| | Y2 | 22 ± 1,73 ^a |
| | Témoin | 20 ± 2,64 ^a |
| 1 | Y1 | 27 ± 1,00 ^a |
| | Y2 | 25 ± 1,00 ^a |
| | Témoin | 25 ± 1,73 ^a |
| 2 | Y1 | 43 ± 3,60 ^a |
| | Y2 | 40 ± 1,73 ^a |
| | Témoin | 27 ± 1,73 ^b |
| 3 | Y1 | 60 ± 3,00 ^a |
| | Y2 | 57 ± 1,73 ^a |
| | Témoin | 52 ± 1,00 ^b |
| 4 | Y1 | 65 ± 1,00 ^a |
| | Y2 | 59 ± 3,60 ^b |
| | Témoin | 57 ± 2,64 ^b |

Les valeurs avec des lettres différentes dans la même colonne diffèrent significativement (p < 0,05).

VI.2.3 Evolution de l'acidification du yaourt au cours du stockage réfrigéré

Pendant le stockage à 4°C, le pH, l'acidité titrable et la cinétique de croissance des bactéries lactiques ont été mesurés à un intervalle de 7 jours jusqu'à 28 jours. Les valeurs de pH ont diminué pendant le stockage pour tous les échantillons de yaourts (Tableau XVIII). Des résultats similaires ont été observés pendant le stockage réfrigéré à 4°C pendant 28 jours pour le yaourt probiotique enrichi en poudre de peler d'ananas riche en fibres (Sah et al., 2016).

Le pH normal du yaourt commercial varie de 4,0 à 4,4 (Sahan et al., 2008 ; Kroger, 1976). Dans la présente étude, l'augmentation de la période de stockage de 1 à 28 jours a considérablement diminué les valeurs de pH pour l'échantillon témoin de 4,51 à 4,29. Cependant, il a été observé que les valeurs de pH des yaourts enrichis n'étaient pas

considérablement modifiées lors du stockage pendant 28 jours prouvant que la qualité des yaourts enrichis en PGL n'a pas été affectée lors du stockage. Selon ces résultats, il est médité que l'ajout de graines de lin au yaourt pourrait prolonger sa durée de conservation comme trouvé par **Seo et al. (2009)** pour le yaourt additionné de nano- poudre de chitosane.

Tableau XVIII : Effet de la supplémentation du yaourt avec la PGL sur le pH et l'acidité titrable (°D) pendant 28 jours de stockage à 4 ° C

| Types de yaourt | Période de stockage (jours) | | | | |
|------------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | 1 | 7 | 14 | 21 | 28 |
| pH | | | | | |
| Témoin | 4,51 ± 0,036 ^b | 4,48 ± 0,01 ^b | 4,33 ± 0,06 ^a | 4,34 ± 0,036 ^b | 4,29 ± 0,01 ^c |
| Y1 | 4,37 ± 0,017 ^a | 4,35 ± 0,036 ^a | 4,27 ± 0,02 ^a | 4,22 ± 0,026 ^a | 4,20 ± 0,01 ^a |
| Y2 | 4,41 ± 0,017 ^a | 4,38 ± 0,026 ^a | 4,29 ± 0,045 ^a | 4,26 ± 0,020 ^a | 4,24 ± 0,020 ^b |
| Acidité titrable (°D) | | | | | |
| Témoin | 69 ± 2,64 ^b | 73 ± 1,00 ^c | 85 ± 3,60 ^b | 87 ± 1,73 ^c | 91 ± 1,00 ^c |
| Y1 | 78 ± 1,00 ^a | 83 ± 2,64 ^a | 90 ± 1,73 ^a | 100 ± 1,73 ^a | 105 ± 2,64 ^a |
| Y2 | 75 ± 1,73 ^a | 79 ± 1,73 ^b | 88 ± 1,00 ^a | 92 ± 2,64 ^b | 97 ± 1,73 ^b |

Les valeurs avec des lettres différentes dans la même colonne diffèrent significativement (p <0,05).

L'ajout de la PGL aux échantillons de yaourt a augmenté significativement les valeurs de l'acidité titrable (Tableau XVIII). De plus, les valeurs de l'acidité titrable pour tous les échantillons étudiés ont légèrement augmenté lorsqu'elles ont été conservées à 4°C pendant 28 jours. Ces résultats sont conformes à ceux trouvés par **Ozturkoglu-Budak et al.(2016)** et **Raho Ghalem et al.(2013)** qui ont travaillé sur des yaourts supplémentés respectivement de noix séchées et de l'huile de *Rosmarinus officinalis*.

VI.2.4 Analyse sensorielle

Le graphique radar permet de répartir des données par rapports à un épicerie, ça veut dire plus les points du graphique sont proches du centre, moins les valeurs seront élevées, et plus ils en seront éloignés et plus grandes seront les valeurs ou les notes. L'avantage de ce type de graphique c'est de pouvoir réaliser ces observations d'un seul coup d'œil La figure n°16 représente les résultats de l'analyse sensorielle des yaourts.

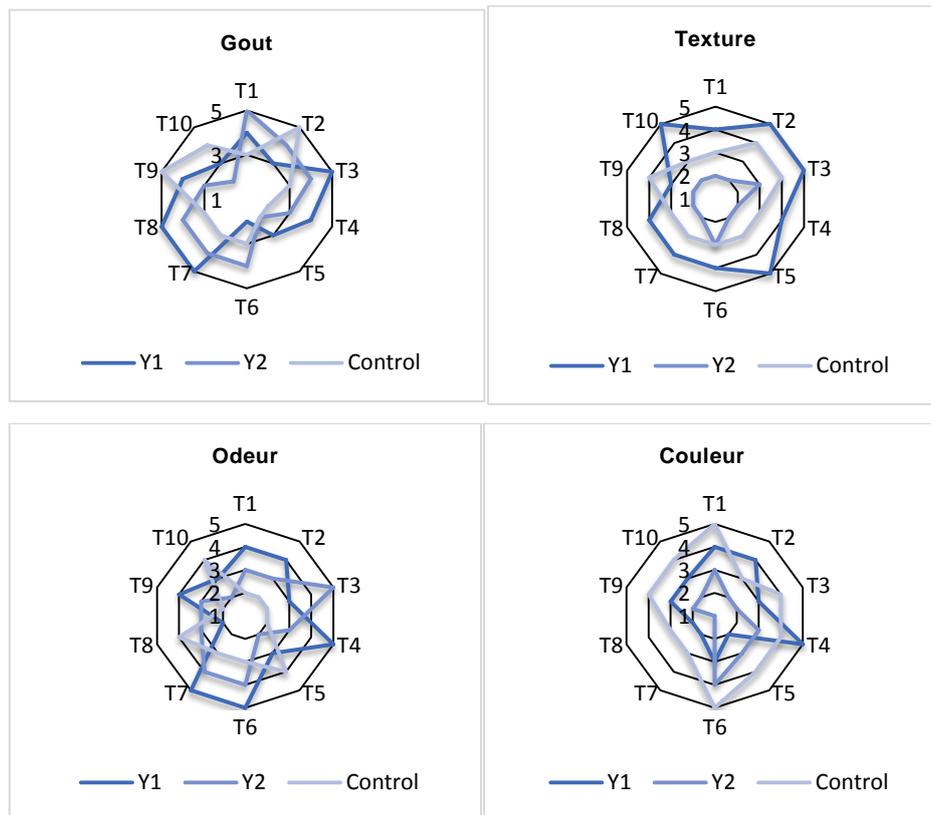


Figure n°16 : Propriétés sensorielles des yaourts. (1: produit non standard impropre à la consommation à 5: produit d'excellente qualité) (T1 à T10: dégustateurs).

La supplémentation par la PGL a largement influencé les paramètres analysés. L'échantillon témoin était acceptable, les dégustateurs ont apprécié la texture crémeuse des yaourts Y1 et le témoin. La substitution du lait entier en poudre par le lait écrémé en poudre a donné les notes les plus basses sur la texture et la couleur. Cela peut être expliqué par la montée en surface des graines de lin moulues en raison de leur richesse en matière grasse ; sur le point visuel, cet effet est considéré comme indésirable.

De plus, l'écémage du lait donne un yaourt plus ferme, moins crémeux avec une synérèse importante. Concernant le goût et l'odeur, les dégustateurs ont exprimé une préférence des yaourts supplémentés par rapport au témoin. Cette préférence peut éventuellement s'expliquer par le goût et l'odeur de graines de lin qui sont similaires à celles des noisettes. La même préférence a été donnée à Y1 pour la bonne texture due au pouvoir gélifiant des graines de lin qui donne des yaourts de fermeté désirable. Globalement, en termes de classement, les dégustateurs ont préféré Y1 suivi par le yaourt témoin et enfin Y2.

VI.2.5 Analyse microbiologique

VI.2.5.1 Cinétique de croissance des ferments lactiques

Suite aux résultats de l'analyse sensorielle, le yaourt Y2 n'a pas été pris en considération pour l'analyse microbiologique.

*Lactobacillus delbrueckii*ssp. *bulgaricus* produit des acides aminés essentiels en raison de sa nature protéolytique, et de la relation symbiotique de *L. delbrueckii*ssp. *bulgaricus* avec *S. thermophilus* bien établie; ce dernier organisme produit également des facteurs de croissance (Shah, 2000).

Tableau XIX : Effet de la supplémentation du yaourt avec la PGL sur la viabilité des ferments lactiques (UFC /ml) pendant la fermentation

| Types de yaourt | Durée de fermentation (hours) | | |
|---|--|--|--|
| | 1h30 | 2h30 | 3h30 |
| Viabilité de <i>S. thermophilus</i> (UFC/ml) | | | |
| Témoin | $9,02 \times 10^7 \pm 6,00 \times 10^{5(a)}$ | $9,98 \times 10^7 \pm 1,05 \times 10^{6(a)}$ | $2.45 \times 10^8 \pm 1,73 \times 10^{6(a)}$ |
| Y1 | $9,99 \times 10^7 \pm 1,01 \times 10^{6(b)}$ | $1,13 \times 10^8 \pm 1,73 \times 10^{6(b)}$ | $3.63 \times 10^8 \pm 2,64 \times 10^{6(b)}$ |
| Viabilité de <i>L. bulgaricus</i> (UFC/ml) | | | |
| Témoin | $9,00 \times 10^6 \pm 2,00 \times 10^4 (a)$ | $1,65 \times 10^7 \pm 5,56 \times 10^6 (a)$ | $4.88 \times 10^7 \pm 6,08 \times 10^5 (a)$ |
| Y1 | $9,30 \times 10^6 \pm 3,80 \times 10^5 (a)$ | $5.21 \times 10^7 \pm 6,92 \times 10^5 (b)$ | $7.94 \times 10^7 \pm 3,60 \times 10^5 (b)$ |

Les valeurs avec des lettres différentes dans la même colonne diffèrent significativement ($p < 0,05$).

Pendant la période de fermentation et la période de stockage (Tableau XIX et Figure n°17), la croissance de *S. thermophilus* est supérieure à celle de *L. bulgaricus*, le même effet a été observé par **Muniandy et al. (2015)** dans l'étude sur la comparaison de l'effet du thé vert, blanc et noir sur la cinétique de croissance de *Streptococcus thermophilus* et *Lactobacillus spp.* dans le yaourt pendant le stockage réfrigéré.

Le nombre de *S. thermophilus* et *L. bulgaricus* viables a augmenté au cours du temps de fermentation pour tous les échantillons. Cependant, l'ajout de PGL a entraîné une croissance plus importante des bactéries lactiques par rapport au témoin (Tableau XIX). Ceci, peut être expliqué par la richesse des graines de lin en nutriments et en fibres alimentaires qui fournissent une source supplémentaire de glucides pour les bactéries lactiques et qui ont un

fort effet positif sur l'activité de certaines souches de bactéries lactiques (**Garcia-Perez et al., 2005**).

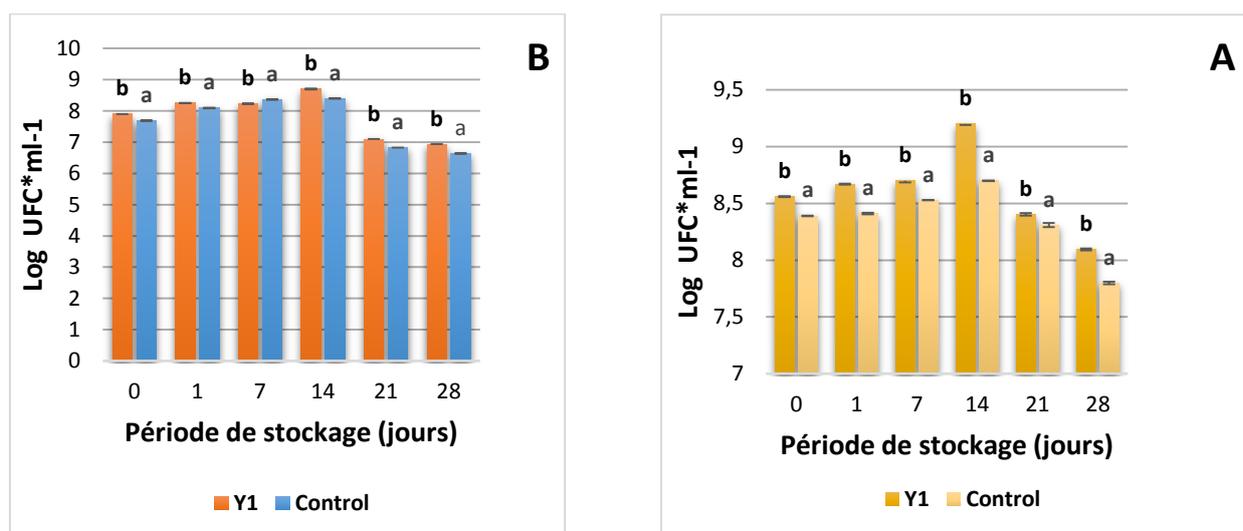
La productivité élevée des acides gras à chaîne courte (acétate, propionate et butyrate) et la stimulation sélective de la croissance et / ou de l'activité des probiotiques (**Gibson et al., 2004**) de la gomme soluble des graines de lin ont montré leur potentiel comme source de prébiotiques (**Qian et al., 2012**).

La cinétique de croissance des ferments lactiques pendant 28 jours de stockage à 4°C est illustrée dans la Figure n°17. Le taux de croissance obtenu après un jour de stockage pour les deux échantillons était supérieur à celui recommandé par le Codex Alimentarius (10^7 UFC / g) (**Bertolino et al., 2015**). La concentration maximale des deux souches a été obtenue après deux semaines de stockage pour les deux types de yaourt.

L'addition de la PGL a augmenté significativement le nombre de bactéries lactiques viables par rapport au témoin. En effet, *S. thermophilus* a atteint une concentration moyenne de 9,20 \log_{10} UFC *ml⁻¹ au 14^e jour, une concentration supérieure à celle obtenue avec l'échantillon témoin (8,70 \log_{10} UFC *ml⁻¹). *Lactobacillus bulgaricus* a atteint une concentration moyenne de 8,70 \log_{10} UFC *ml⁻¹ dans le yaourt enrichi en comparaison avec 8,40 \log_{10} UFC *ml⁻¹ dans le yaourt témoin le même jour.

La viabilité des souches a diminué à partir du 21^{ème} jour de stockage réfrigéré en particulier dans le yaourt témoin. À la fin de la période de stockage, dans les yaourts supplémentés, le nombre de *S. thermophilus* a atteint une concentration moyenne de 8.10 \log_{10} UFC*ml⁻¹, une concentration légèrement plus élevée à celle obtenue dans le yaourt témoin (7.80 \log_{10} UFC*ml⁻¹). Le nombre de *Lactobacillus bulgaricus* trouvé était de 6,93 \log_{10} UFC *ml⁻¹ dans le yaourt enrichi contre 6,64 \log_{10} UFC *ml⁻¹ dans le témoin.

La réduction du nombre de *S. thermophilus* et de *Lactobacillus bulgaricus* au cours des deux dernières semaines de stockage pourrait être attribuée à *L. delbrueckii ssp. bulgaricus* qui produit de l'acide lactique au cours du stockage réfrigéré. Ce phénomène est connu dans l'industrie comme post-acidification. L'acide produit pendant le stockage réfrigéré (post-acidification) provoque une perte de viabilité des bactéries probiotiques (**Shah, 2000 ; Mishra, 2005 ; Madureira, 2011**).



VI.2.5.2 Qualité hygiénique des yaourts

Le tableau XX résume l'ensemble des résultats de l'analyse microbiologique du contrôle de qualité des yaourts étudiés.

Tableau XX : Qualité hygiénique des yaourts

| Germes recherchés | Y1 | Y2 | témoin | Norme (m) | Norme (M) |
|-------------------------------------|-----|-----|--------|-----------|-----------------|
| Enterobacteriaceae | <1 | <1 | <1 | 10 | 10 ² |
| Staphylocoques à coagulase +/g | <1 | <1 | <1 | 10 | 10 ² |
| Salmonella /25g | Abs | Abs | Abs | 100 | |
| <i>Listeria monocytogenes</i> / 25g | Abs | Abs | Abs | Absence | Absence |

(m) : minimum, (M) : maximum

D'après ce tableau, les trois yaourts présentent une qualité microbiologique hygiénique satisfaisante selon l'arrêté interministériel du 04 octobre 2016 (**JORA N°39**).

VI.2.6 Microstructure des yaourts

Des micrographies ont été enregistrées par le MEB pour visualiser les changements dans la microstructure du gel de yaourt conservé à 4°C pendant 28 jours et expliquer les

modifications de ses propriétés physiques et structurales suite à l'enrichissement par la PGL. La Microstructure des yaourts se compose d'un réseau tridimensionnel d'agrégats de micelles de caséine, dans lequel la forme globulaire est nettement observable, interrompues par des zones vides (**Ramírez-Sucre et Velez-Ruiz, 2013**).

Le yaourt témoin présente un réseau ramifié continu (figure n°20 A1,A2), avec des pores plus au moins grands en comparant avec les yaourts enrichis, ce qui peut conduire à un grand réarrangement structurel et une contraction du réseau protéique pendant le stockage (**Matumoto-Pintro et al., 2011**). **Lee et Lucey (2003)** ont signalé une plus grande séparation de lactosérum d'un gel de yaourt faible, ce qui est relative à des pores plus gros dans le réseau protéique. **Tudorica et al. (2004)** a aussi rapporté que la taille des pores agrandis et le développement d'un réseau plus ouvert est attribué à l'augmentation des niveaux de b-glucanes dans le caillé du lait. En outre, des pores plus grands et la réticulation réduite entre les micelles de caséine pourraient expliquer la fermeté réduite. **Pelaes Vital et al. (2015)** ont observé des structures similaires dans une étude sur le yaourt supplémenté d'un extrait aqueux de *Pleurotus ostreatus*.

Une microstructure plus compacte a été observée avec l'enrichissement à 3% de PGL. Cette disposition microstructurale entraîne moins de réarrangement protéique et une susceptibilité réduite à la synérèse, (figure n°18 B1, B2, C1, C2), spécialement dans le yaourt Y1 (figure n°18 B1, B2). Ceci peut être expliqué par la présence de pectine et de la gomme dans la PGL, qui peuvent avoir interagi avec des protéines et des exopolysaccharides bactériens formant une structure plus compacte avec une plus grande viscosité apparente et une capacité à piéger la phase de lactosérum (**Espírito-Santo et al., 2013a,b**), cette disposition rend le yaourt Y1 plus doux et plus stable pendant le stockage. Dans le yaourt Y2 ; fabriqué avec la poudre de lait écrémé et la PGL, la montée en surface du yaourt de cette dernière a empêché une interaction complète entre les constituants des graines de lin, notamment les fibres et les caséines du lait ce qui a induit un gel plus faible et une synérèse plus élevée par rapport au yaourt Y1.

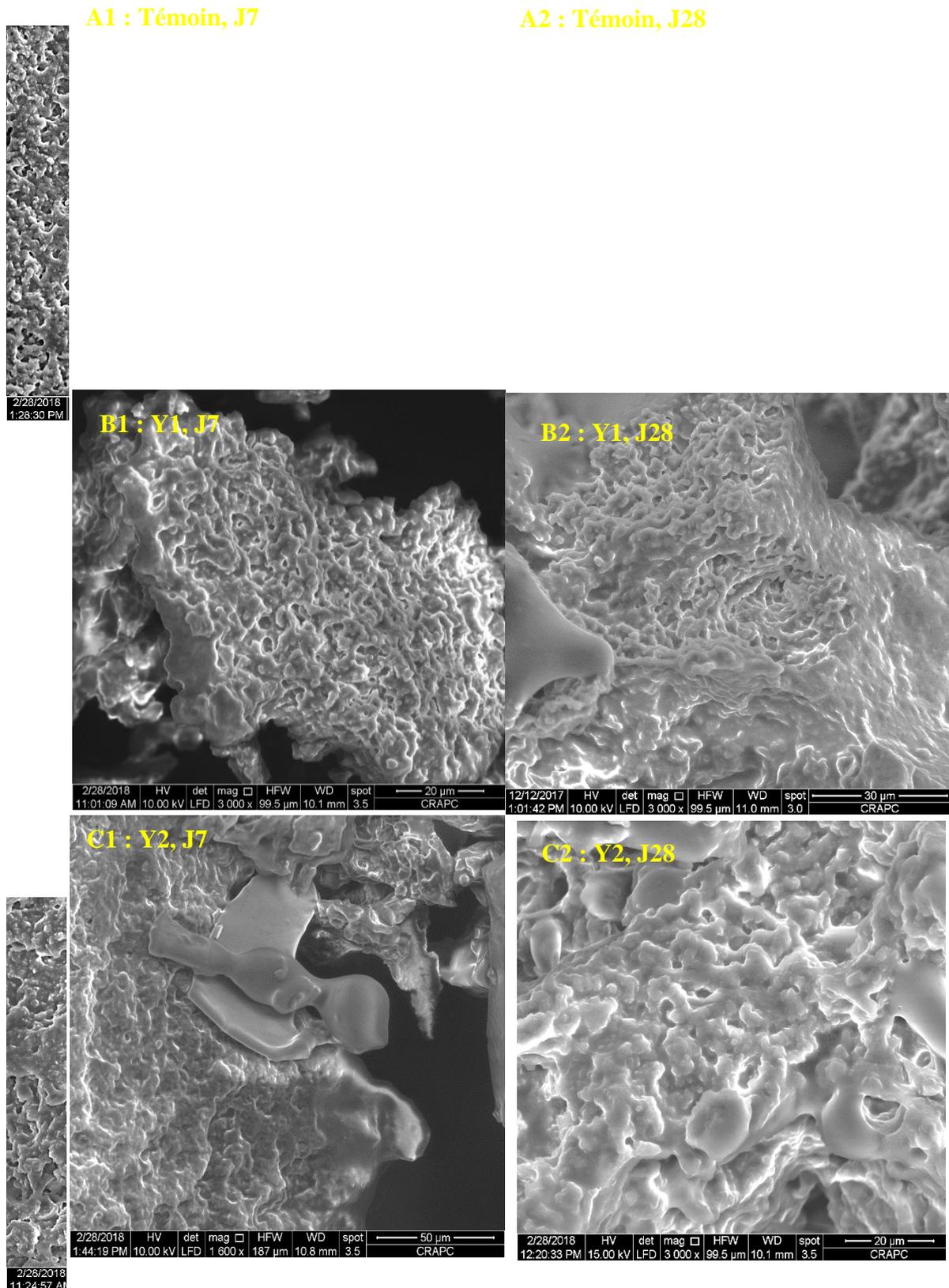


Figure n°18: Micrographies déterminées par le MEB des yaourts conservées à 4 ° C pendant

28 jours supplémentés de 3% de PGL (Y1,Y2) et yaourt témoin à 0% PGL

Le réseau de caséine s'est densément emballé dans les micrographies des trois types de yaourt au jour 28 (figure n°20, A2,B2,C2) ceci est dû aux réarrangements structuraux pendant le stockage conférant aux gels une plus grande fermeté.

VI.2.7 Synérèse

La libération spontanée du lactosérum, connue sous le nom de synérèse, est considérée comme l'un des paramètres les plus importants indiquant la qualité du yaourt. C'est un défaut visible majeur, apparaissant sous forme d'accumulation de lactosérum à la surface des gels de yaourts, et peut nuire à l'acceptabilité du produit par le consommateur (Purwandari et al., 2007).

La figure n°18 représente le taux de synérèse dans les yaourts enrichis en PGL exprimé en millilitres de la phase sérique libérée par 100g d'échantillon. Le taux le plus élevé de synérèse 48.6% a été observé au niveau du yaourt témoin. Ce phénomène peut être expliqué par une réduction du pH, l'évolution de ce dernier, affecte la structure du gel, qui est un réseau de micelles de caséine contenant des protéines de lactosérum dénaturées par la chaleur liées à la surface de ces micelles (Delikanli et Ozcan, 2014).

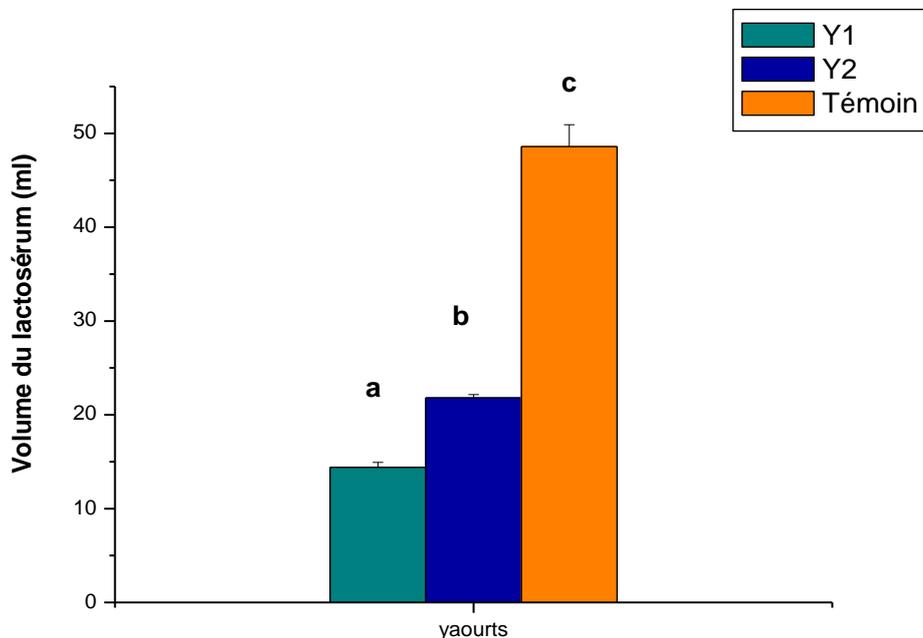


Figure n° 19: Synérèse des yaourts.

L'acidification provoque plusieurs changements tels que la dissolution progressive du calcium et du phosphate inorganique et la diminution de la charge électrique nette négative des micelles de caséine, y compris celle de la couche poilue.

Puisque la couche s'effondre, la caséine elle-même devient insoluble près de son pH isoélectrique (environ 4,6). Ce qui provoque l'agrégation des micelles. Même une faible diminution du pH conduit à une diminution de la charge, ce qui affaiblit la stabilité colloïdale (Walstra et al., 2006) et favorise la libération du lactosérum de la matrice de gel. Des résultats similaires ont été observés par Izadi et al. (2015) et Dönmez et al. (2017) pour des yaourts supplémentés de phytostérols et de la poudre de thé et de café respectivement.

La fortification du yaourt avec la PGL a significativement diminué la libération spontanée du lactosérum, les graines de lin sont très riches en fibres solubles tel que les gommages, les mucilages et les pectines, lorsqu'elles entrent en contact avec l'eau, elles deviennent visqueuses.

Cette addition accroît l'osmose et diminue la synérèse. La réduction de cette dernière peut être liée à l'absorption d'eau non liée par les graines de lin. Nos résultats sont similaires à ceux observés par Mousavi et al. (2019) pour le yaourt brassé enrichi en GL et par Basiri et al. (2018) pour le yaourt brassé enrichi en mucilages de GL. Ces derniers sont des hydrocolloïdes neutres, ils diminuent la synérèse et augmentent la viscosité de la phase continue (Hansen, 1993)

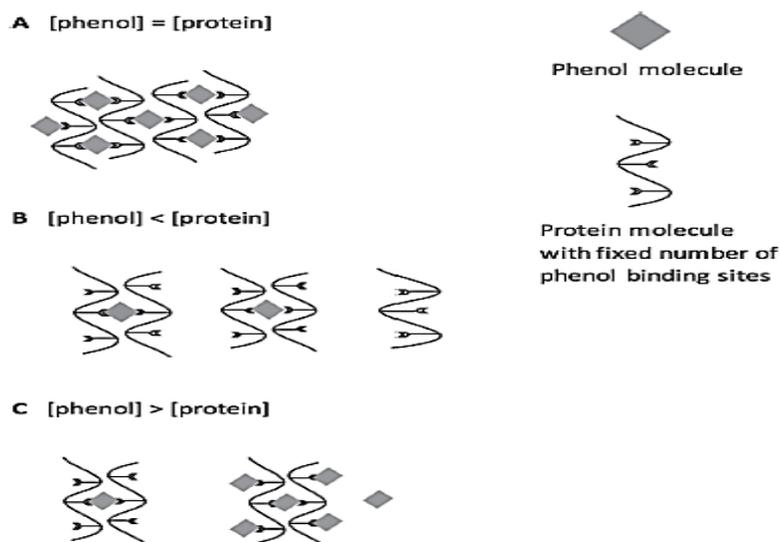


Figure n°20: Modèle proposé par Siebert et al. (1996) pour expliquer la stabilité de la structure du gel des yaourts pour différents rapports de [protéine] et de [polyphénol]

La capacité de rétention d'eau de la pectine réduit significativement la quantité de lactosérum formée dans les yaourts. Selon **Everett et Mc Leod (2005)**, la pectine est constituée par les hydrocolloïdes anioniques qui sont classés comme des polysaccharides adsorbants, qui interagissent avec le réseau de caséine et augmente sa capacité à piéger la phase de lactosérum. Ceci nous permet de déduire que les fibres solubles des graines de lin préservent la structure du yaourt. Ces résultats sont conformes avec ceux obtenus par **Espírito-Santo et al.(2013)** dans une étude sur l'enrichissement du yaourt avec les fibres de fruit de la passion.

Le comportement des yaourts supplémentés en PGL, vis-à-vis la synérèse, peut aussi être expliqué par la richesse des graines de lin en polyphénols, **Siebert et al. 1996** a proposé un modèle d'interaction protéine-polyphénol (figure n°19), selon ce modèle, les polyphénols vont se fixer sur les sites des molécules de protéines ce qui conduit à créer de nouvelles cages qui pourraient avoir un rôle dans la limitation de la libération de sérum du réseau du gel de yaourt.

D'après la figure n°18, au sein des yaourts enrichis, on observe une synérèse plus importante dans le yaourt Y2 qui est due à sa teneur plus faible en solides par rapport à Y1, ce qui induit de faibles interactions entre la matière grasse de la poudre de lait et de la PGL et le réseau du gel (**Izadi et al., 2015**).

VI.2.8 Texture des yaourts

La texture est un attribut important de la qualité du yaourt. La structure du gel de yaourt est le résultat de l'agrégation de la caséine par réduction du pH et liaison au disulfure entre les caséines k et les protéines de lactosérum dénaturées (**Sah et al., 2016**).

Les résultats de l'analyse de la texture des trois yaourts formulés, réalisée par pénétrométrie, sont représentés au niveau du tableau XXI.

Tableau XXI: Paramètres de pénétration des yaourts additionnés de PGL

| Echantillon | Force du gel (N) | Distance de rupture (mm) | Force à 15 mm (N) | Indice de rigidité $\times 10^2$(N/mm) | Synérèse ml/100ml |
|--------------------|---------------------------|---------------------------------|----------------------------|--|--------------------------|
| Y1 | 0,084± 0,041 ^a | 2,66±0,57 ^a | 0,118 ± 0,049 ^a | 3,3±1,74 ^a | 14,4±0,52 ^a |
| Y2 | 0,371± 0,078 ^b | 3,66 ±0,57 ^a | 0,362 ± 0,048 ^b | 9,92±1,77 ^{ab} | 21,8±0,36 ^b |

| | | | | | |
|--------|--------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------|
| Témoin | 0,164± 0,04 ^a | 3,33±0,57 ^a | 0,229 ± 0,067a ^b | 4,86±0,58 ^a | 48,6±2,33 ^c |
|--------|--------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------|

La fermeté est considérée comme l'un des paramètres les plus importants pour la perception de la texture des yaourts. Les yaourts enrichis en poudre de graines de lin ont présenté un comportement mécanique significativement différent, ce dernier a révélé une fermeté ou rigidité très importante du yaourt Y2 avec une force de gel de 0.371N par rapport à Y1 avec 0.084N et le témoin avec 0.164N.

Le yaourt Y1 s'est avéré le moins rigide avec une distance à la première rupture de 2.66mm et une force de gel à 15mm de distance de 0.118N. Le module ou l'indice de rigidité du gel est plus important dans le cas de Y2 suivis du témoin, puis par Y1.

La distance de rupture est un paramètre textural essentiel représentant la cohésion de yaourt dans l'analyse du profil de texture. Une distance plus longue pour que le gel se brise indiquerait une meilleure propriété de cohésion (Xu et al., 2019), aucune différence significative n'a été notée pour la distance à la première rupture entre les trois yaourts.

D'une manière générale, l'incorporation de la poudre de graine de lin a entraîné une réduction de la fermeté du gel de Y1 par rapport au témoin ce qui reflète le caractère faible de ce gel.

La texture du yaourt est associée à sa composition en solides totaux, à la présence de stabilisateurs et des fruits (Shaker et al., 2000). L'augmentation de la viscosité quand la teneur en matière grasse augmente est due à l'augmentation des solides totaux du lait qui a un effet significatif dans la fermeté du gel (Tamime et Robinson, 1985). Ces facteurs sont aussi importants et décisifs pour la texture que pour la synérèse, une propriété physique majeure puisqu'elle limite la durée de vie et l'acceptabilité du produit (Kiros et al., 2016). Dans les yaourts enrichis en PGL, le yaourt Y2 avec la poudre de lait écrémé présente une synérèse de 21.8ml/100ml, plus importante que celle de Y1 14.4 ml/100ml, au niveau du yaourt témoin, la synérèse est la plus grande. Sachant que plus le lactosérum est spontanément séparé du réseau protéique du yaourt et plus ce dernier devient plus ferme, ces résultats expliquent en partie la rigidité et la force des gels des yaourts Y2 et le témoin.

De plus, une augmentation de la fermeté du yaourt peut être due aux modifications de la structure des pores résultantes des interactions protéiques étendues ou aux liaisons croisées entre les polysaccharides de GL (la pectine et la gomme), la caséine de lait et les protéines de lactosérum dénaturées, formant un réseau solide de petits pores, rendant le gel du yaourt très dense et donc rigide (Mudgil et al., 2018). (Ledward, 1993 ; Mariano et al., 2011) ont

également rapporté des résultats similaires avec l'ajout d'épaississants comme les concentrés de protéines, d'amidon et de lactosérum au yaourt.

L'ajout de graines de lin aux échantillons de yaourt brassé aux probiotiques a entraîné une augmentation significative de leur dureté, tandis que les variations de la durée de stockage n'ont pas affecté leur dureté d'une manière significative (Mousavi et al., 2019).

Amellal (2008) a noté une fermeté plus importante du yaourt nature et du yaourt additionné de la poudre de datte de la variété Mech-Degla par rapport aux variétés Degla-Beïda et Frezza.

Pang et al. (2018) ont observé que l'ajout de trois types d'amidons issus du maïs cireux à différents degrés de réticulation pourrait effectivement augmenter la fermeté du yaourt. Des résultats similaires ont été rapportés avec l'amidon modifié de tapioca (Sandoval-Castilla et al., 2004). L'ajout de la gélatine à raison de 1,0% a augmenté la dureté du yaourt de trois fois, à 1,25%, la dureté a été multipliée par sept par rapport au yaourt témoin au lait de chamelle (Mudgil et al., 2018).

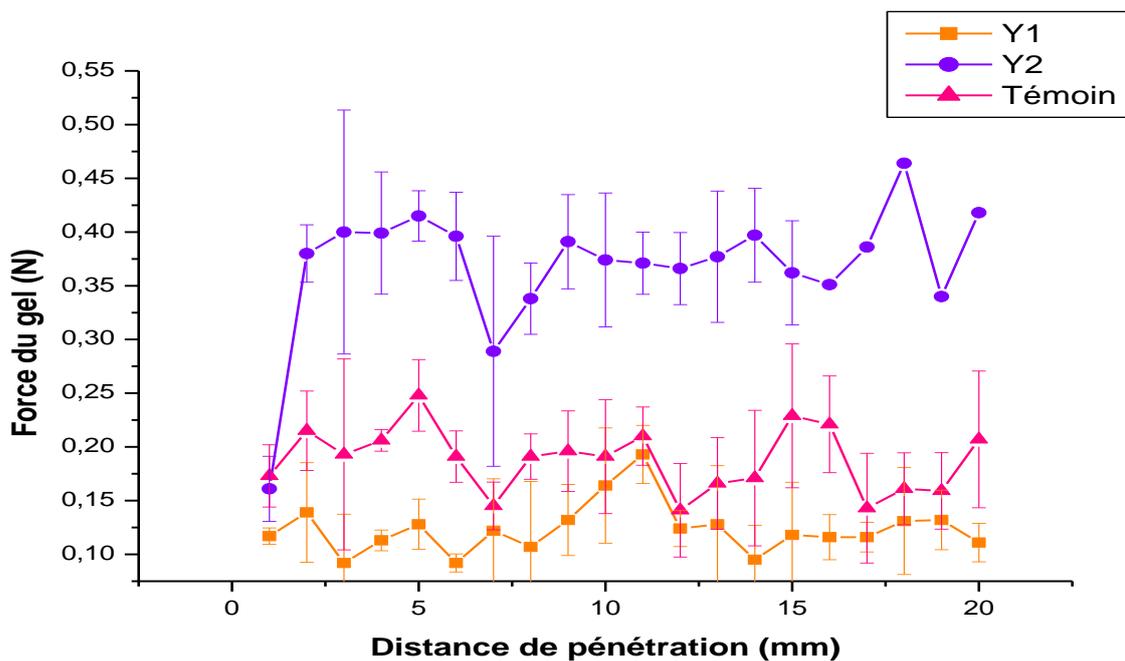


Figure n°21: Profil de pénétrométrie des yaourts

VI.2.10 Comportement rhéologique

Il a été constaté que les fibres alimentaires interagissent avec la matrice de caséine, modifiant ainsi le processus de gélification du lait. Les interactions entre les polysaccharides

simples et la matrice de caséine au cours de la fermentation ont fait l'objet de nombreuses études (Fagan *et al.*, 2006).

Les interactions entre les sources de fibres complexes telles que les matériaux de paroi cellulaire des légumes et des fruits et les composants du lait ont été étudiées dans une moindre mesure. **Mc Cann *et al.* (2011)** ont incorporé des matériaux de paroi cellulaire de carotte dans le processus de fermentation du lait afin de produire un yaourt en lot. Ils ont découvert que les matériaux de paroi cellulaire de carotte peuvent structurer le yaourt faible en matière grasse en améliorant la force du gel et en réduisant le lactosérum.

Les graines de lin sont riches en matériaux de parois des cellules végétales qui ont le potentiel d'être incorporé dans le lait et d'influencer la cinétique de sa coagulation et la structure du produit enrichi. En outre, la production de yaourt sans stabilisants hydrocolloïdes répond à la demande croissante de produits «de marque propre» (Loveday *et al.*, 2013). Les constituants mucilagineux de la graine de lin ont un potentiel considérable pour une utilisation comme gomme alimentaire (BeMiller, 1973 ; Mazza et Biliaderis, 1989). Des études antérieures ont révélé que le mucilage de la graine de lin se compose de deux types de polysaccharides: un arabi-noxylane neutre et un matériau de type pectique acide (Muralikrishna *et al.*, 1987). Récemment, Wanner berger *et al.* (1991) ont rapporté que les mucilages extraits de différents cultivars de lin présentent des propriétés rhéologiques différentes.

Des expériences ont montré que les conditions d'extraction ont également un impact important sur le rendement, la composition chimique et les propriétés rhéologiques de la gomme de lin (Cui *et al.*, 1994).

Propriétés d'écoulement

La viscosité est un attribut de qualité des yaourts et peut être affectée par la composition de la formulation (par exemple la teneur totale en solides solubles et les stabilisants), le type de cultures de départ, le traitement thermique et les méthodes de traitement (Sun-Waterhouse *et al.*, 2013), la force et le nombre des liens entre les micelles de caséine, ainsi que leur structure et leur distribution spatiale (Lucey et Singh, 1998).

Les comportements rhéologiques des trois yaourts fabriqués sont représentés par les courbes d'écoulement illustrées par la figure n° 22. Pour l'ensemble des yaourts, la viscosité diminue au fur et à mesure que l'on augmente le taux de cisaillement (shear rate). Selon Horne (1998) et Lucey (2002), cela peut se produire en raison de la destruction physique des

liaisons faibles entre les molécules du produit et de la diminution de l'énergie d'interaction entre elles. C'est le comportement d'un fluide non-Newtonien.

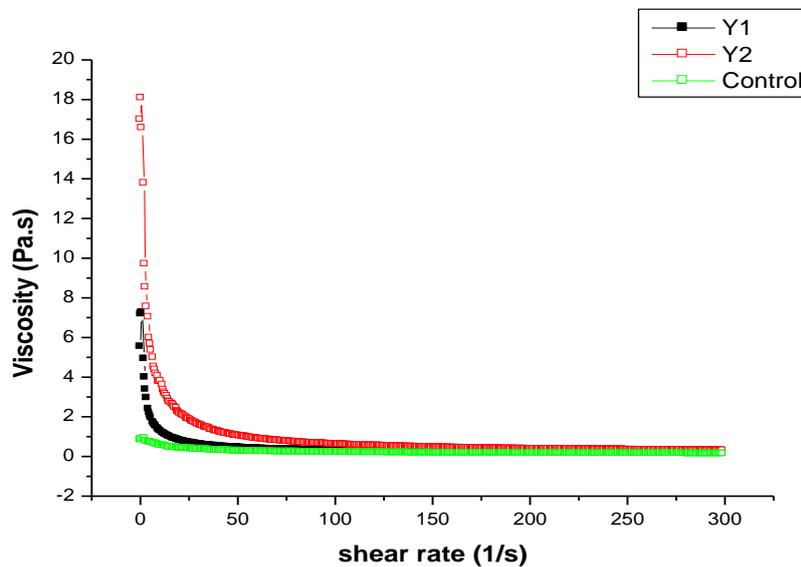


Figure n°22 : Courbes de viscosité des yaourts

Au niveau de toutes les courbes d'écoulement ainsi que les courbes d'hystérésis des yaourts (figures n° 23-25), on observe l'absence de caractéristique linéaire indiquant un comportement d'amincissement par cisaillement comme décrit par **Rohm (1993)**, il s'agit de fluides rhéofluidifiants (pseudoplastiques). La même tendance a également été observée dans les travaux de : **Amellal (2008)**, **Sanz et al. (2008)**, **Pasephol et al. (2008)** et **Pang et al. (2018)**.

Cui et al. (1994) ont observé un comportement d'amincissement par cisaillement de la gomme de graines de lin (GGL) à des concentrations supérieures à 1,0% (p / p) sur une large gamme de vitesses de cisaillement (0,1 à 1000 s⁻¹). La fraction neutre de GGL présente un comportement d'amincissement par cisaillement à des concentrations supérieures à 0,5%. Un tel comportement pourrait être attribué à une masse moléculaire élevée de l'arabinoxylane.

Des courbes d'écoulement de type newtonien ont été obtenues pour des solutions préparées à partir de fractions acides de GGL à toutes les concentrations étudiées. Cette découverte pourrait s'expliquer par la taille moléculaire beaucoup plus petite du polysaccharide dans la fraction acide du GGL (**Cui et al., 1994**).

Dans le but d'une caractérisation objective du comportement des différents yaourts, les valeurs expérimentales ont été ajustées au modèle mathématique rhéologique de Herschel-

Bulkley. Ce modèle est adapté à la caractérisation du comportement rhéologique dans la zone pseudoplastique, c'est-à-dire à des intervalles de taux de cisaillement ni très élevés ni très faibles, et a présenté de bons coefficients de détermination ($R^2 \geq 0,99$).

$$\tau = K\gamma^n + \tau_0$$

avec :

τ : taux de cisaillement (Pa) ;

τ_0 : taux de cisaillement initial (yield stress) (Pa) ;

K : coefficient de consistance (Pa sⁿ);

γ : vitesse de cisaillement (1/s) ;

n: index de comportement d'écoulement.

Les paramètres du modèle d'Herschel-Bulkley sont représentés dans le tableau XXII.

Tableau XXII : Les paramètres rhéologiques du modèle d' Herschel-Bulkley

| Yaourts | Viscosité apparente (Pa.s) | Thixotropie (Pa/s) | Yield stress τ_0 (Pa) | Index n |
|---------|----------------------------|--------------------|----------------------------|---------|
| Y1 | 2.663 | 1418 | 4.528 | 0.4760 |
| Y2 | 9.420 | 2802 | 15.55 | 0.33 |
| Témoin | 1.361 | 922.1 | 0.3925 | 0.5682 |

L'ajustement à ce modèle est important car il prend en compte la limite d'élasticité, un paramètre important dans le traitement du yaourt (**Molina et al., 2018**).

Toutes les valeurs de n (indice d'écoulement) sont inférieures à 1, confirmant le comportement pseudoplastique des yaourts, comme déjà rapportés (**Tamime et Robinson, 2007 ; Teles Et Flôres, 2007 ; Fischer et al., 2009**).

L'enrichissement des yaourts par la PGL a augmenté le taux de cisaillement initial τ_0 - appelé aussi limite d'élasticité- par rapport au témoin. Cela indique qu'une contrainte de cisaillement plus élevée est nécessaire pour déclencher l'écoulement dans ces yaourts (**Pang et al., 2018**).

La viscosité apparente a augmenté dans les échantillons de yaourts supplémentés de PGL (Y1 : 2.663Pa.s, Y2 : 9.420 Pa.s) par rapport au témoin (1.361 Pa.s), ceci est probablement

liée à la quantité de fibres dans les graines de lin qui a entraîné des améliorations et des réarrangements du réseau de gel de caséine, ainsi qu'une inhibition du retrait et de l'expulsion du lactosérum (**Mousavi et al., 2019**). Ces résultats sont en désaccord avec ceux observés par **Pasephol et al. (2008)** et **Sah et al. (2016)** pour des yaourts enrichi en inuline et en poudre d'ananas riche en fibres. Il a été rapporté que la gomme de lin a une viscosité élevée, une capacité de rétention d'eau, de bonnes propriétés émulsifiantes et de faibles propriétés de gélification (**Chen et al., 2006 ; Fedeniuk et Biliaderis, 1994**).

Le comportement rhéologique vis-à-vis la viscosité des deux yaourts supplémentés n'est pas seulement affecté par les graines de lin ou par la teneur en extrait sec des échantillons, mais par le type de lait et sa teneur en matière grasses aussi (**Helal et al., 2018**). Notamment, le yaourt allégé (Y2) présente une viscosité beaucoup plus importante que celle du yaourt entier. **Shaker et al. (2000)** et **Helalet et al. (2018)** ont signalé une augmentation de la viscosité avec une augmentation de la teneur en matière grasse des échantillons de yaourt. Cette contradiction peut être expliquée par le mucilage de lin qui se trouve principalement à la couche extérieure de la coque, cette coque riche en fibres est capable de libérer facilement une substance mucilagineuse (gomme soluble) lorsqu'elle est trempée dans de l'eau. Le yaourt allégé présentait une synérèse plus importante par rapport au yaourt entier (figure n°16), le contact de mucilages avec le lactosérum a engendré un yaourt plus visqueux.

En comparaison avec la gomme de caroube, la gomme de guar et la gomme de xanthane à une concentration de 0,3% (p / v), la gomme de GL présentait une plus faible viscosité sur une plage de taux de cisaillement de 10 à 1000 S⁻¹ (**Mazza et Biliaderis, 1989**). Sa faible viscosité est favorisée dans l'enrichissement en fibres alimentaires des aliments sans modifier la texture de manière excessive (**Qian et al., 2012**).

La thixotropie peut être considérée comme une comparaison qualitative entre différents yaourts; l'énergie nécessaire pour détruire partiellement leur structure est proportionnelle à la surface de l'hystérésis (**Steffe, 1996**). Tous les échantillons présentaient des caractéristiques thixotropes (figures n° 23-25), dues aux différences de tension et de viscosité entre les courbes ascendante et descendante. Ce phénomène résulte de la rupture du gel, il peut être quantifié comme la surface située entre les courbes d'écoulement. Plus la zone entre les courbes est grande, plus l'effet thixotrope est important (**Institut Adolfo Lutz, 2005**). Une thixotropie supérieure a été observée au niveau des yaourts supplémentés de graines de lin par rapport au yaourt témoin, cette caractéristique est représentée par de plus grandes surfaces des boucles d'hystérésis, notons, 2802 Pa/s pour Y2 suivie de 1418 Pa/s pour Y1

contre 922.1 Pa/s pour le témoin. Cela veut dire que les yaourts contenant la PGL sont plus susceptibles de se décomposer structurellement par l'application d'une contrainte de cisaillement et que la restructuration des agrégats de protéines en une structure de réseau cohérente après le cisaillement était plus difficile. Ces résultats sont en désaccord avec ceux obtenus par **Mathias et al. (2011)** dans une étude sur le yaourt avec l'arôme de café, enrichi de différents épaississants.

L'ajout de stabilisants dans le yaourt vise principalement à améliorer la consistance et à augmenter la viscosité, ce qui contribue à réduire la séparation du lactosérum et à retenir l'eau. Les stabilisants construisent la matrice de gel et augmentent ainsi la stabilisation des molécules de protéines en augmentant ainsi la capacité de liaison à l'eau des composants du lait, principalement les protéines de caséine (**Jung, 2002**). Cette stabilité de la structure du gel de yaourt n'a pas été observée dans nos échantillons y compris dans le yaourt nature (témoin), ce phénomène peut être expliqué par l'utilisation du saccharose dans nos recettes.

Fiszman et Duran (1989) ont trouvé que l'augmentation de la concentration dans les gels de K- carraghénanes à 1 % contribue à augmenter la force maximale à la rupture. Ceci est attribué à l'hydratation du saccharose qui laisse moins d'eau disponible et favorise ainsi les interactions polysaccharide-polysaccharide. Ils ont remarqué que pour différentes concentrations en carraghénanes et pour un mélange (1 : 1) de carraghénanes et gomme de caroube (1 %), la force maximale à la rupture diminue à partir de 40 % de saccharose. Ce changement de comportement aux alentours de la concentration de 40 % a été attribué à une baisse d'hydratation des polysaccharides (**Elfak et al., 1977**), il est à noter aussi qu'à cette concentration, le saccharose adopte sa forme repliée et commence à établir des liaisons sucre-sucre, ce qui le sépare de la trame du gel et fragilise celui-ci (**Mathlouthi, 2010**).

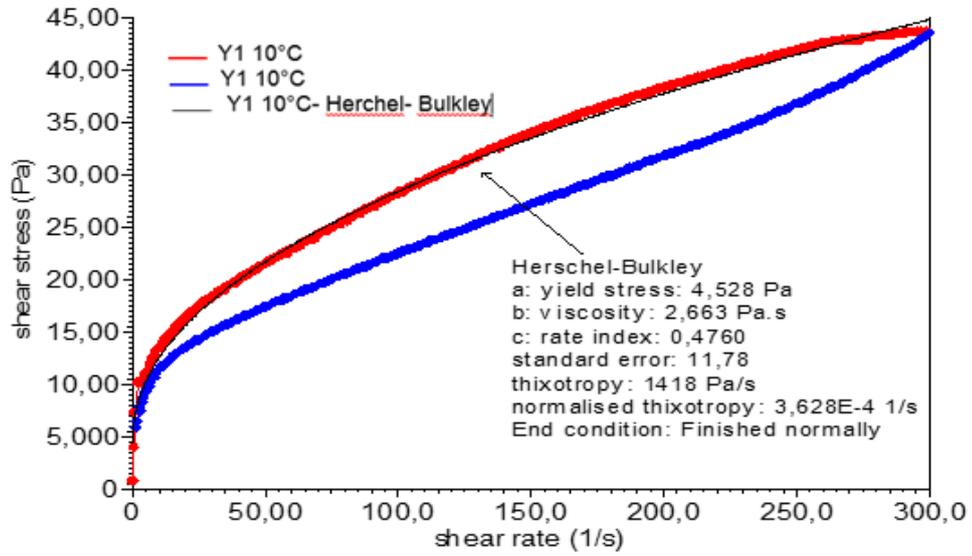


Figure n°23 : Courbe d’hystérésis du yaourt Y1

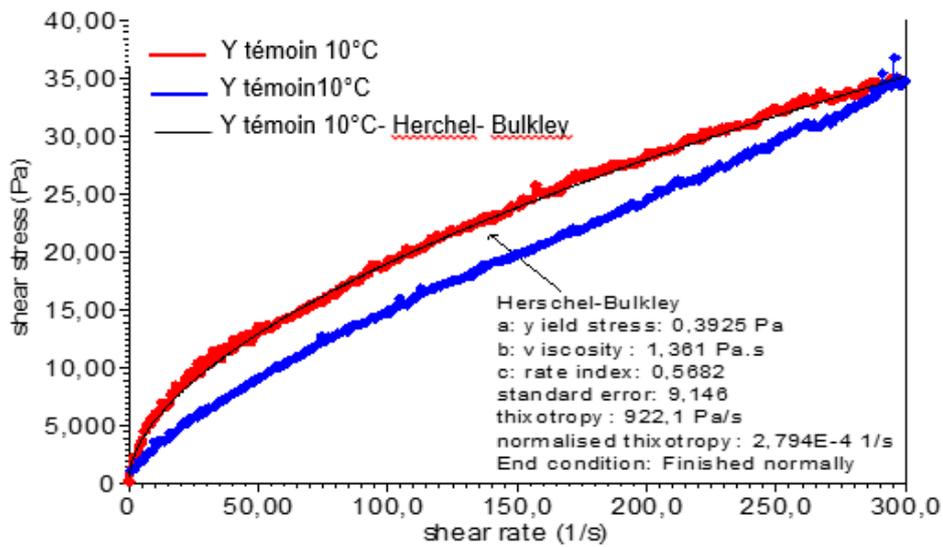


Figure n°24 : Courbe d’hystérésis du yaourt témoin

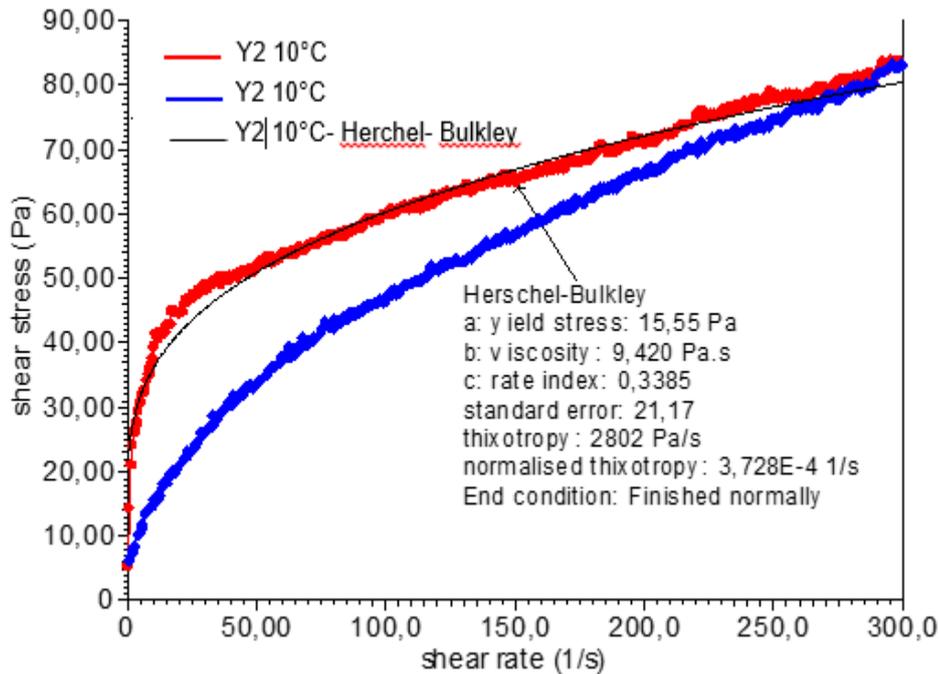


Figure n°25 : Courbe d’hystérésis du yaourt Y2

La thixotropie est provoquée par le bri de la structure dans une dispersion sous cisaillement. Des particules faibles dans une suspension ou des liaisons entre particules peuvent se casser sous une contrainte de cisaillement. La thixotropie dans les suspensions chauffées des protéines de lactosérum a été attribuée à la rupture des liaisons SS, de Vander Waals et des interactions ioniques et hydrophiles entre les particules de protéines (Teo *et al.*, 2000).

☀ Propriétés viscoélastiques

Le test dynamique fournit des informations utiles sur les propriétés viscoélastiques des yaourts. L’application de petites déformations oscillantes sur le yaourt permet d’obtenir deux modules dynamiques, à savoir le module de conservation (G') et le module de perte (G''), qui indiquent respectivement le degré de comportement solide (élastique) et liquide (visqueux) ainsi que l’angle de phase ou l’angle δ delta (G''/G') (Rao et Steffe, 1992 ; Ross-Murphy, 1994).

Mécaniquement, un gel est un matériau mou, ayant des caractéristiques à la fois solides et liquides. Il devrait présenter un spectre mécanique semblable à un solide; c'est-à-dire que

$G' > G''$ dans toute la gamme de fréquences accessibles expérimentalement avec peu de dépendance à la fréquence du module (Clark et Ross-Murphy, 1987 ; Almdal et al., 1993). Cependant, dans une situation pratique, il pourrait être difficile de déterminer mécaniquement si un matériau est un gel ou un liquide.

Les spectres mécaniques obtenus dans la zone viscoélastique des différents yaourts avec la variation d'oscillation de 0 à 100 Pa sont représentés au niveau des figures n° 26-28. On constate que le module de conservation (élastique) G' , le module de perte (visqueuse) G'' et l'angle delta dépendent fortement des contraintes oscillatoires. Une caractéristique de gels faibles.

Aux faibles contraintes oscillatoires, nous notons un comportement élastique (solide) des trois yaourts puisque $G' > G''$. Il est bien connu que le G' est un facteur rhéologique crucial car il est fortement lié à la capacité de formation de bolus lors de la déglutition (Cho et Yoo, 2015; Yoon et Yoo, 2017).

Un évènement de croisement entre G' et G'' a été détecté pour le témoin à 8.25 Pa, pour Y1 à 10.29 Pa et pour Y2 à 24.56 Pa. A partir de ce point les yaourts deviennent de plus en plus liquides avec $G'' > G'$. Les valeurs de G' , G'' sont plus importantes au niveau de Y2 suivi de Y1 et le yaourt témoin par la suite. D'après Li et al., (2012), l'ajout de la gomme de lin aux caséines a considérablement augmenté l'importance des valeurs G' et G'' , ce qui indique que le réseau de gel de gomme de lin et de caséine mélangés est beaucoup plus solide que le gel contenant uniquement de la caséine. Chang et al. (2014) ont constaté que dans les pâtes d'amidon de riz contenant des sucres, le G' diminuait en présence de sucres,

Au niveau des courbes de l'angle delta, avec l'augmentation des contraintes oscillatoires pour les trois types de yaourts, on remarque la présence de « la région viscoélastique linéaire » ce qui reflète une stabilité de la structure, une structure de yaourts liquides avec des valeurs de l'angle delta élevées notamment pour le yaourt sans matière grasse enrichis en PGL, Y2 ($\delta \approx 90^\circ$) contre Y1 et le témoin ($\delta \approx 83^\circ$), sachant que plus l'angle delta se rapproche de 0° , ça signifie un comportement comme le solide et plus il tend vers 90° , ça signifie un comportement comme le liquide.

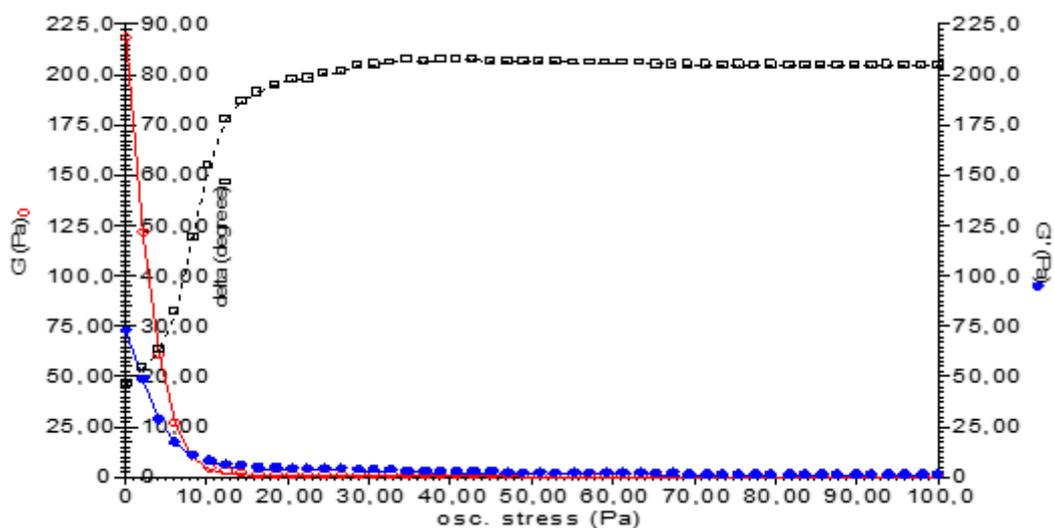


Figure n°26 : Variation de G' , G'' et delta du yaourt témoin en fonction des contraintes d'oscillation

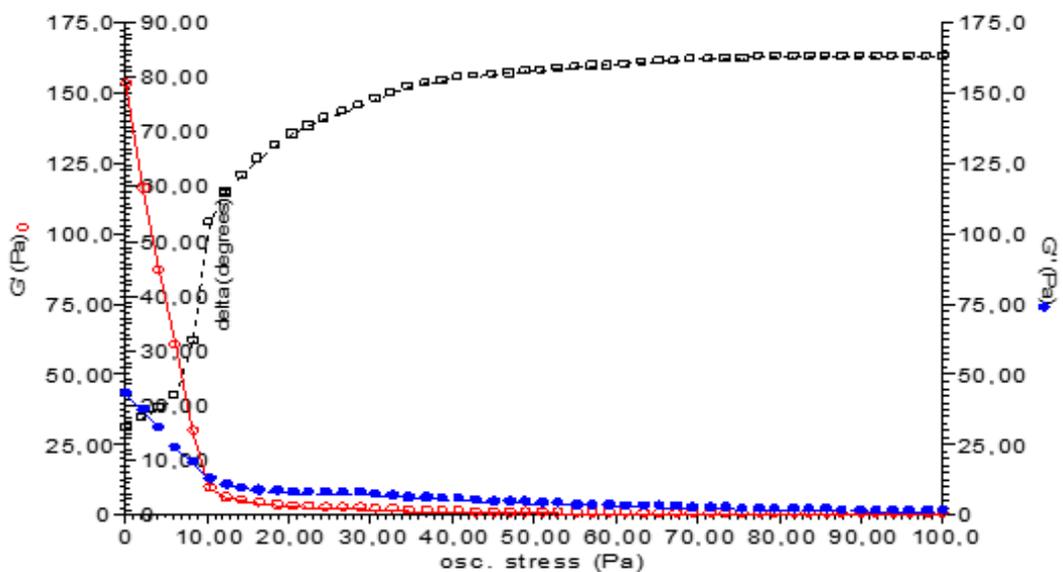


Figure n°27 : Variation de G' , G'' et delta du yaourt Y1 en fonction des contraintes d'oscillation

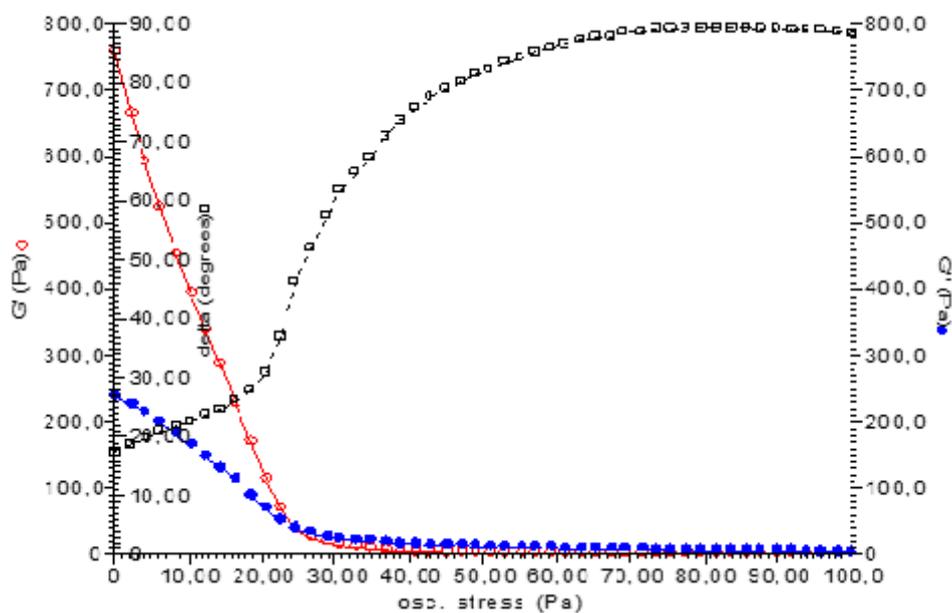


Figure n°28 : Variation de G', G'' et delta du yaourt Y2 en fonction des contraintes d'oscillation



Y2

Témoin

Y1



Figure n°29: Yaourts formulés

Conclusion

Cette étude vise à la fois la caractérisation de la poudre de graines de lin et l'élaboration d'une formulation alimentaire de type fonctionnel à forte valeur ajoutée. Notre travail nous a permis d'enrichir un yaourt ferme sucré avec la poudre de graines de lin.

La caractérisation biochimique de la poudre de graines de lin a montré des niveaux adéquats et très intéressants en nutriments, confirmant la possibilité de l'utilisation de cette poudre comme produit diététique. La richesse de cette dernière en protéines, en sucres, en lipides et en cendre constitue un attribut avantageux. La teneur en eau de la PGL est de 6,02%, cette teneur permet d'assurer une bonne conservation sur une durée plus ou moins longue.

L'analyse des minéraux par la spectrométrie d'absorption atomique (SAA) a révélé des teneurs importantes en potassium, en magnésium, en calcium et en sodium : 662.67, 382.18, 197.26 et 26.81 mg/100g respectivement. Des teneurs souhaitables ont été notées pour les microéléments, à savoir, le fer, le cuivre, le zinc et le manganèse. Le plomb et le cadmium ont été détectés à l'état de trace <0.02 mg/100g.

La poudre de graines de lin constitue une bonne source de substances bioactives telles que les composés phénoliques, la teneur en polyphénol totaux a été estimée à 462.93mg/100g. Ces polyphénols sont connus pour leurs vertus biologiques (pouvoir antioxydant...) et suscitent un intérêt grandissant quant à la substitution des antioxydants de synthèse par des extraits naturels des plantes dans les produits alimentaires. L'activité antioxydante de l'extrait méthanolique de PGL est de 83,63% (% d'inhibition).

La spectrométrie de fluorescence du rayon X a permis de détecter la présence de macroéléments dans la PGL, majoritairement le potassium avec un pourcentage massique de 48,6% suivis du calcium à 30.6% et du phosphore à 7,06%.

Les micrographies obtenues par l'analyse microscopique électronique à balayage de la PGL ont montré des zones caractérisées par une accumulation de grains formant des agrégats de formes variables et des lingots poreux, présentant ainsi une microstructure adéquate pour faciliter la pénétration du liquide à l'intérieur des pores de la poudre.

L'analyse granulométrique par diffraction laser de la PGL a présenté une distribution granulométrique multimodale ou hétérogène. La taille des particules varie de 7,586 µm à 549,541 µm avec une surface spécifique de 0.0485 m²/g.

Le diffractogramme de l'analyse par diffraction des rayons X (DRX) de la PGL a révélé la présence d'un seul pic large, caractérisant la présence d'une structure amorphe de la poudre.

L'analyse thermogravimétrique de la PGL a démontré l'existence de quatre étapes de perte en masse proportionnelles à sa composition biochimique.

Notre étude a été conçue pour élaborer un yaourt enrichi de graines de lin moulues et pour évaluer les effets de cet enrichissement sur les propriétés physicochimiques, microbiennes et sensorielles du produit pendant la fermentation et le stockage à 4°C.

L'évaluation des paramètres physico-chimiques des yaourts préparés: yaourt nature au lait entier en poudre, yaourt supplémenté de PGL à base de poudre de lait entier et yaourt supplémenté de PGL à base de poudre de lait écrémé a indiqué un enrichissement significatif de ces yaourts en ce qui concerne les protéines, l'extrait sec, les cendres, les sucres et la matière grasse par rapport au yaourt nature.

L'incorporation de la PGL dans les yaourts a permis leur enrichissement en minéraux, notamment, le calcium, le sodium et le manganèse.

Les données sur le pH, l'acidité titrable, l'analyse microbienne et sensorielle obtenues à partir de la présente étude indiquent que ce yaourt enrichi est un produit acceptable avec des effets bénéfiques pour la santé. Le pH et les valeurs d'acidité titrable obtenus pendant les 28 jours de stockage à 4°C nous ont permis de déduire que l'ajout de la PGL au yaourt peut assurer la viabilité des microorganismes et prolonger sa durée de conservation.

Pour l'évaluation sensorielle, les panélistes ont donné les meilleures notes, concernant l'odeur, la texture et le goût au yaourt au lait entier en poudre supplémenté ; pour ce qui est de la couleur, le yaourt témoin était le plus préféré. La substitution de la poudre de lait entier par la poudre de lait écrémé dans le yaourt Y2 a provoqué la montée de la PGL en surface, par conséquent un déclassement de ce dernier a été noté relativement à la couleur.

Pendant la période de stockage réfrigéré, la multiplication des bactéries lactiques était plus importante dans les yaourts supplémentés de PGL avec un taux de *S. thermophilus* ($1,25 * 10^8$ UFC / ml), et de *Lactobacillus bulgaricus* ($0,85 * 10^7$ UFC / ml), ces valeurs sont considérées comme une caractéristique souhaitable du produit consommé régulièrement qui confère des avantages pour la santé.

En ce qui concerne la texture, le yaourt Y2 s'est avéré le plus ferme, suivi du yaourt témoin et du yaourt Y1 par la suite avec des forces des gels qui sont respectivement : 0.371, 0.164, 0.084N.

D'après l'étude rhéologique, les trois yaourts formulés peuvent être considérés comme des fluides non Newtonien (rheofluidifiants ou pseudoplastiques) et le modèle mathématique d'Herschel Bulkley décrit bien leur comportement avec un coefficient de détermination $R^2 \geq 0,99$. Une thixotropie supérieure a été observé au niveau des yaourts supplémentés de PGL par rapport au yaourt témoin.

Le test dynamique fournit des informations utiles sur les propriétés viscoélastiques des yaourts. Nous avons constaté qu'aux faibles contraintes, les trois yaourts ont présenté un comportement élastique $G' > G''$. Un évènement de croisement entre G' et G'' a été détecté pour le témoin à 8.25 Pa, pour Y1 à 10.29 Pa et pour Y2 à 24.56 Pa. A partir de ce point les yaourts deviennent de plus en plus liquides avec $G'' > G'$. Les valeurs de l'angle delta sont élevées notamment pour le yaourt Y2 ($\delta \approx 90^\circ$) suivi du yaourt Y1 et le témoin ($\delta \approx 83^\circ$).

En ce qui concerne la qualité hygiénique, les trois yaourts présentent une qualité microbiologique hygiénique parfaitement conforme aux normes.

Sur la base de ces résultats, nous pouvons déduire que l'enrichissement de yaourt avec des graines de lin représente un excellent choix pour l'amélioration de sa valeur nutritive, de sa structure, et de sa qualité organoleptique, il s'agit d'un aliment pratique, riches en protéines, en fibres, en lignanes et en ALA, qui fournit des avantages diététiques pour la santé et qui satisfait l'intérêt et le goût du consommateur.

À partir de ces conclusions, quelques perspectives peuvent être suggérées afin d'approfondir les connaissances sur ce nouveau produit, ainsi il serait intéressant de :

- réaliser un essai de fabrication d'un yaourt brassé avec la poudre de lait écrémé ;
- substituer le sucre par le miel d'abeille ;
- réaliser une étude clinique de confirmation du caractère fonctionnel du yaourt enrichi à la poudre de graines de lin ;
- étudier la stabilité à l'oxydation de la matière grasse des yaourts ;
- caractériser des polyphénols des graines de lin et dosage des lignanes ;
- caractériser des fibres de graines de lin ;
- effectuer une étude économique sur le coût de production de ce yaourt sur le plan industriel.

Références bibliographiques

A

Abou-Donia S.A., 1986. Egyptin fresh fermented milk (review), New Zealand. *Journal of Dairy Science and Technology*, vol.19, pp.7-15.

Abou Jaoude Dayana, Olabi Ammar, Najm Nour El Ouyoun, Malek Amal, Saadeh Carol, Baydoun Elias, Toufeili Imad, 2010 .Chemical composition, mineral content and cholesterol levels of some regular and reduced-fat white brined cheeses and strained yogurt (Labneh). *Dairy Sci. Technol.*, vol.90, pp.699–706.

Accolas J.P., Blooquel R., Didienne R., Regmier J., 1982. Acidifying, properties of thermophilic lactic bacteria in relation to yogurt productions. *Industria lechera*, vol.62, pp.14-16.

Adlercreutz H., 1990.Western diet and western diseases: Some hormonal and biochemical mechanisms and associations. *Scand. J. Clin. Lab.Investig. Suppl.*, vol.201, pp.3–23

Adlercreutz H., Bannwart C., Wahala K., Makela T., Brunow G., 1993. Inhibition of human aromatase by mammalian lignans and isoflavonoid phytoestrogens. *J. Steroid. Biochem. Mol. Biol.*, vol.42, pp.147–153.

AFNOR NF, 1982.Recueil de normes françaises des produits dérivés des fruits et légumes jus de fruits. Ed. AFNOR, 325p.

AFNOR, 1985. Contrôle de la qualité des produits laitiers. Analyses physiques et chimiques, 3 ème ed. Paris : AFNOR, 321 p.

Ahmed M., DaunJ., PrzybylskiR., 2005. FT-IR based methodology for quantitation of total tocopherols, tocotrienols and plastochromanol-8 in vegetable oils, *Journal of Food Composition and Analysis*, vol.18, pp.359–364.

Ailhaud Gérard, Massiera Florence, Weill Pierre, Legrand Philippe, Alessandri Jean-Marc, GuesnetPhilippe, 2006.Temporal changes in dietary fats: role of n-6 polyunsaturated fatty acids in excessive adipose tissue development and relationship to obesity. *Prog. Lipid Res.*, vol. 45, pp.36-203.

Akan J.C., Kolo B.G., Yikala B.S., Ogugbuaja V.O., 2013. Determinations of Some Heavy Metals in Vegetable Samples from Biu Local Government Area, Borno State, North Eastern Nigeria. *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*, vol.1, n.2, pp.40-46.

Akande K.E., Doma U.D., Agu H.O., Adamu H.M., 2010. Major anti nutrients found in plant protein sources: their effect on nutrition. *Pak. J. Nutr.*, vol.9, pp.827–83.

Akin Huberson, 2008. Evolution du pH pendant la fermentation alcoolique de moûts de raisins : modélisation et interprétation métabolique. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique De Toulouse, 125p.

Akraim Fowad, 2005. Effet du traitement thermique des graines de lin sur la biohydrogénation ruminale des acides gras polyinsaturés et la qualité de la matière grasse du lait de vache. Thèse de doctorat. L'institut National Polytechnique De Toulouse, 137p.

Aksil Tounsia, 2015. Caractérisation physico-chimique du fruit de l'arbousier (*Arbutus unedo* L.) du nord Algérien et de la datte (Mech-Degla). Thèse de doctorat. Université M'hamed Bougara-Boumerdes, Faculté des Sciences, 119 p.

Alais Charles et Linden Guy, 1987. Abrégé de biochimie alimentaire. Ed. Masson, Paris, 284 p.

Almdal K., Dyre J., Hvidt S., Kramer O., 1993. Towards a phenomenological definition of the term 'gel'. *Polym. Gels Networks*, vol.1, pp.5-17.

Al-Okbi S.Y., 2005. Highlights on functional foods, with special reference to flaxseed. *Journal of Natural Fibers*, vol.2, pp. 63-68.

Alu'datt M.H., Rababah T., Ereifej K., Alli I., 2013. Distribution, Antioxidant and Characterisation of Phenolic Compounds in Soybeans, Flaxseed and Olives. *Food Chem.*, vol.139, pp.93–99.

Aman P., 2001. An oligomer from flaxseed composed of secoisolariciresinol diglucoside and 3-hydroxy-3-methylglutaric acid residues. *Photochemistry*, vol.58, pp.587–590.

Amatayakul T., Sherkat F., Shah NP., 2006. Physical characteristics of set yoghurt made with altered casein to whey protein ratios and EPS producing starter cultures at 9 and 14% total solids. *Food Hydrocolloids*, vol.20, pp. 314–324.

Amellal H., 2008. Aptitude technologiques de quelques variétés communes de dattes : Formulation d'un Yaourt Naturellement Sucré et Aromatisé. Thèse de doctorat, Université M'hamed Bougara-Boumerdes, Faculté des sciences, 165 p.

Amoroso M.J., Nanca de Nandra M.C., 1990. Microbiologie, Aliments, Nutrition, p.105.

Angelov M., Kostov G., Simova E., Beshkova D., Koprinkova-Hristova., 2009. Oxygen influence in the mutual metabolism of *St. thermophilus* and *Lb. bulgaricus* in yogurt starter cultures, <http://www.revue-genie-industriel.info/> (in press).

Anwar F. et Przybylski R., 2012. Effect of solvents extraction on total phenolics. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, vol.11, pp. 293–301.

Ardestani A. et Yazdanparast R., 2007. Antioxidant and free radical scavenging potential of *Achillea santolina* extract. *Food Chemistry*, vol.104, pp. 21–29.

Arend W.P., Dayer J.M., 1995. Inhibition of the production and effects of interleukin-1 and tumor necrosis factor α in rheumatoid arthritis. *Arthritis Rheum.*, vol. 38, pp.151–160.

Aryana Kayanush J., Olson Douglas W., 2017. A 100-Year Review: Yogurt and other cultured dairy products. *J. Dairy Sci.*, vol.100, pp.9987–10013. DOI: org/10.3168/jds.2017-12981

Astrup A., 2012. Flaxseed dietary fibers lower cholesterol and increase fecal fat excretion, but magnitude of effect depends on food type. *Nutr. Metab.*, vol. 9, pp.1-8.

Audigie C.J., Figarella J. et Zonzain F., 1978. Manipulation d'analyse biochimique. Ed. Soin, Paris, 233 p.

Austin F. L. et Wolff I. A., 1968. Sinapine and related esters in seed meal of *Crambe abyssinica*. *J. agric. Food Chem.* Vol.16, n.1, pp.132-135. DOI: 10.1021/jf60155a026

Awatif I., Khalil M., BadawyH., 1996. Effect of natural and synthetic antioxidants on the stability of virgin olive oil, *Annals Agric. Sci., Ain Shams Univ., Cairo*, vol.41, n.1, pp.269-280.

B

Baba Waqas N., Jan Kaunser, Punoo Hilal A., Wani Touseef Ahmed, Dar Mohd Masarat, Masoodi F.A., 2018. Techno-functional properties of yoghurts fortified with walnut and flaxseed oil emulsions in guar gum. *LWT - Food Science and Technology*. DOI: 10.1016/j.lwt.2018.02.007

Barrantes E., Tamime A. Y., Sword A. M., Muir D. D., Kalab M., 1996. The manufacture of set-type natural yoghurt containing different oil: Rheological properties and microstructure. *International Dairy Journal*, vol.6, pp. 827-837.

Barthet V. J., Klensporf-Pawlik D., Przybylski R., 2014. Antioxidant Activity of Flaxseed Meal Components. *Can. J.Plant Sci.*, vol.94, pp.593–602.

Basiri Sara., Haidary Naghmeh., Shekarforoush Seyed Shahram., Niakousari Mehrdad., 2018. Flaxseed mucilage: A natural stabilizer in stirred yogurt. *Carbohydrate Polymers* <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.01.049>.

- Batmanglij N., 2007.** Taste of Persia: An Introduction to Persian Cooking. Mage Publishers, 176p.
- Beal C. et Corrieu G., 1991.** Influence of pH, temperature, and inoculum composition on mixed cultures of *Streptococcus thermophilus* and *Lactobacillus bulgaricus*. *Biotechnol. Bioeng.*, vol.38, pp.90-98.
- Béal C. et Sodini I., 2003.** Fabrication des yaourts et des laits fermentés. Techniques de l'Ingénieur, traité Agroalimentaire, Doc., 315p.
- Beard B.H., Comstock V.E., 1980.** Flax. Hybridization of Crop Plants. American Society of Agronomy-Crop Science Society of America, pp.357-366.
- Beejmohun V., Fliniaux O., Grand E., Lamblin F., Bensaddek L., Christen P., Kovensky J., Fliniaux M.A., Mesnard F., 2007.** Microwave-assisted extraction of the main phenolic compounds in flaxseed. *Phytochem. Anal.*, vol.18, pp.275–282.
- Becker T., Puhan Z., 1989.** Effect of different process to increase the milk solids non-fat content on the rheological properties of yoghurt. *Milchwissenschaft*, vol.44, pp.626- 629.
- BeMiller J.N., 1973.** “Quince Seed, Psyllium Seed, Flaxseed and Okra Gums,” In: R. S. Whistler and J. N. Bemiller, Eds., Industrial Gums, 2nd Edition, Academic Press, New York, pp.331-337.
- Benamara S., Chibane H., Boukhelifa M., 2004.** Essai de formulation d'un yaourt naturel aux dattes, IAA. Actualités techniques et scientifiques, pp.11-14.
- Béreau D., 2001.** "Huiles et fractions insaponifiables de huit espèces de palmiers amazoniens. Thèse de doctorat. L'institut National Polytechnique De Toulouse, 156p.
- Bergamaier D., 2002.** Production d'exopolysaccharides par fermentation avec des cellules immobilisées de *Lactobacillus rhamnosus* RW-959M dans un milieu à base de permeat de lactosérum. Thèse de Doctorat, Université de Laval, Canada, 149 p.
- Berglund D.R., Zollinger R.K., 2007.** Flax production in North Dakota. Fargo: North Dakota State University, Extension Service (NDSU). <http://www.ag.ndsu.edu/pubs/plantsci/crops/a1038w.htm>.
- Bernat N., Cháfer M., González-Martínez C., Rodríguez-García J., Chiralt A., 2014.** Optimisation of oat milk formulation to obtain fermented derivatives by using probiotic *Lactobacillus reuteri* microorganisms. *Food Sci Technol Int*. doi:10.1177/ 1082013213518936
- Bertolino Marta, Belviso Simona, Dal Bello Barbara, Ghirardello Daniela, Giordano Manuela, Rolle Luca, et al., 2015.** Influence of the addition of different hazelnut skins on the physicochemical, antioxidant, polyphenol and sensory properties of yogurt. *LWT – Food Science and Technology*, vol.63, n.2, p.1145-1154. DOI.org/10.1016/j.lwt.2015.03.113
- Bertrand Elaine, 2003.** Le yoghurt sur <http://www.ohdq.com/Ressources/Documents/ElaineBertrand.pdf>

- Bhathena S.J., Ali A.A., Mohamed A.I., Hansen C.T. and Velasquez M.T., 2002.** Differential effects of dietary flaxseed protein and soy protein on plasma triglyceride and uric acid levels in animal models. *Journal of Nutritional Biochemistry*, vol.13, n. 11, pp. 684–689.
- Bhathena S.J, Ali A.A., Haudenschild C., Latham P., Ranich T., Mohamed A.I., Hansen C.T.,Velasquez M.T., 2003.** Dietary flaxseed meal is more protective than soy protein concentrate against hypertriglyceridemia and steatosis of the liver in an animal model of obesity. *J. Am. Coll. Nutr.*, vol. 22, pp.157–164.
- Bhatty R.S., 1993.** Further compositional analyses of flax: mucilage, trypsin inhibitors and hydrocyanic acid. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, vol.70, pp. 899–904.
- Bhatty R.S., 1995.** Nutrient composition of whole flaxseed and flaxseed meal. In: Flaxseed in human nutrition (Cunnane SC. and Thompson LU. eds), AOCS Press, Champaign, IL, pp. 22-42.
- Bierenbaum M.L., Reichstein R., Watkins TR., 1993.** Reducing atherogenic risk in hyperlipemic humans with flax seed supplementation: a preliminary report. *J Am. Coll. Nutr.*, vol.12, pp.501-504.
- Blanc B.,1981.** Biochemical aspects of human milk--comparison with bovine milk. *World review of nutrition and dietetics*, vol. 36,pp.1-89.
- Blois M.S., 1958.** Antioxidant determinations by the use of a stable free radical, *Nature*, vol.181, pp. 1199- 1200.
- Bonnefoy C., Guillet F., Leyral G., Verne-Bourdais E., 2002.** Microbiologie et qualité dans les industries agroalimentaires. Edition Doin CRDP d'Aquitaine, Paris, 245 p.
- Bonnier, 1895.** Revue générale de botanique.
- Bortoluzzi Julien, Malatrait Benjamin, Ribstein Ludovic, 2012.** Les techniques instrumentales d'analyse en ligne, tome2: techniques spectroscopiques. <http://chemphys.u-strasbg.fr/mpb/teach/coursenligne.html>
- Bosku D., MortonI., 1976.** Effect of plant sterols on the rate of deterioration of heated oils. *J. Sci. Food Agric.*, vol.27, pp.928-932.
- Boskou D., 2006.** Sources of natural antioxidants. *Trends Food Sci. Technol.*, vol.17, pp. 505-512.
- Bottazzi V. et Battistotti B., 1972.** Montescani. Influence des souches seules et associées de *Lb. bulgaricus* et *St. thermophilus* ainsi dans le yaourt. *Le Lait*, vol.52, pp.295-305.
- Bouchard-Abouchacra M., 2001.** Evaluation des Capacités de la Microscopie Raman dans la Caractérisation Minéralogique et Physicochimique de Matériaux Archéologiques : Métaux, Vitraux

& Pigments. Thèse de doctorat. Museum National D'histoire Naturelle, Laboratoire de Minéralogie, paris-France, 358p.

Boudier J. F., 1990. Produits frais. *In* laits et produits laitier : Vache - Brebis- Chèvre. pp. 35-66. ed. Luquet, F.M., Technique et Documentation, Lavoisier, Paris.

Bourgeois C.M., Larpent J.P., 1996. Microbiologie alimentaire Tome 2 : Aliments fermentés et fermentations alimentaires. Ed. Tec & Doc-Lavoisier, Paris, 650p.

Bourne M.C., 2002. Food texture and viscosity: Concept and measurement. Academic Press. New York, 78 p.

Bozan B., Temelli F., 2008. Chemical composition and oxidative stability of flax, safflower and poppy seed and seed oils. *Bioresour Technol*, vol.99, pp.6354–6359.

Brand-Williams W., Cuvelier M.E., Berset C., 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity, *Lebensmittel-Wissenschaft und -Technologie/Food Science and Technology*, vol.28, pp. 25-30.

Brissonnet F., Bouix M., Loiseau G., Russel A., Leveau Y., 1994. Le stress bactérien et ses conséquences en génie de l'hygiène IAA, vol.111, pp.106-114.

Buttriss Judith, 1997. Nutritional properties of fermented milk products. *International Journal of Dairy Technology*, vol.50, n.1, pp.21-27.

C

Cann P.A., Read N.W., Holdsworth C.D., 1984. What is the benefit of coarse wheat branin patients with irritable bowel syndrome? *Gut*, vol.24, pp.168–173.

Canvin D. T., 1965. The effect of temperature on the oil content and fatty acid composition of the oils from several oil seed crops. *Canadian Journal of Botany*, vol.43, pp. 63-69.

Caparino O.A., Tang J., Nindo C.I., Sablani S.S., Powers J.R., Fellman J.K., 2012. Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine 'Carabao' var.) powder, *Journal of Food Engineering*, vol.111, pp.135-148.

Carter J.F., 1993. Potential of flaxseeds and flaxseed oil in baked goods and other products in human nutrition. *Cereal FoodsWorld*, vol.38, pp.754–759.

Cayot P., Lorient D., 1998. La micelle de caséine. *In* Structures et techno-fonctions des protéines du lait. Cayot P. & Lorient D. Ed.Technique et Documentation, Lavoisier, Paris, pp.51-79.

Cayot P., Fairise J.F., Colas B., Lorient D., Brile G., 2003. The improvement of rhéological properties of firm acid gels by skim milk heating is conserving after stirring. *Journal of Dairy research*, vol.70, n.4, pp.423-431.

- Carter J.F., 1993.** Potential of flaxseed and flaxseed oil in baked goods and other products in human-Nutrition. *Cereal Foods World*, vol. 38, pp.753–759.
- Cerning J., Buillanne C., Landon M., 1990.** Comparaison of exocellular polysaccharide production by thermophilic lactic acid bacteria. *Science des aliments*, vol.10, pp.443-451.
- CETIOM, 2008.** Stockage à la ferme des oléagineux. http://www.terresinovia.fr/fileadmin/cetiom/kiosque/PDF_fiches_TK/stockage_ferme.pdf
- Chang YH, Lim ST, Yoo B., 2014.** Dynamic rheology of corn starch-sugar composites. *J. Food Eng.*, vol.64, pp.521–7.
- Chang Hee Jeong, Haram Ryu, Ting Zhang, Chi Ho Lee, Han Geuk Seo, Sung Gu Han, 2018.** Green tea powder supplementation enhances fermentation and antioxidant activity of set-type yogurt. *Food Sci Biotechnol*. DOI.org/10.1007/s10068-018-0370-9
- Chen H.H., Xu S.Y., Wang Z., 2006.** Gelation properties of flaxseed gum. *Journal of Food Engineering*, vol.77, n.2, pp.295-303.
- Childs J. and Drake M., 2008.** Sensory properties of yogurt powders. Poster presentation, IFT Annual Meeting, June 2008. Abstract 048-09.
- Cho H.M., Yoo B., 2015.** Rheological characteristics of cold thickened beverages containing xanthan gum-based food thickeners used for dysphagia diets. *J. Acad. Nutr. Diet.*, vol.115, pp.106–111.
- Choe E., Min D. B., 2006.** Mechanisms and factors for edible oil oxidation. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, vol.5, n.4, pp.169–186.
- Chomakov H., 1987.** Bulgarian yogurt–health and long living, Zemizdat” (Ed.), Sofia, (in Bulgarian).
- CIDIL et Inra, 2009.** Du lait aux produits laitiers. CIDIL, Paris, France, pp.19.
- Clark A.H., Ross-Murphy S. B., 1987.** Structural and mechanical properties of biopolymer gels. *Adv. Polym. Sci.*, vol. 83, pp.57-192.
- Congo M., 2012.** Etude des propriétés antiradicalaire et antiproliferative d'extraits de feuilles et de rameaux de *Salvadora Persica L.* (Salvadoraceae).Thèse de pharmacie. Université d'Ouagadougou Burkina Faso, 95 p.
- Coskuner Y. et Karababa E., 2007.** Some physical properties of flaxseed (*Linum usitatissimum L.*). *J. Food Eng.* vol.78, pp.1067–1073.

Courtin P., Monne M., Rul F., 2002. Cell-wall proteinases PrtS and Prt B have a different role in *Streptococcus thermophilus/ Lactobacillus bulgaricus* mixed cultures in milk. *Microbiology*, vol.148, pp.3413-3421.

Coussot P., Grossiord J.L., 2002. Comprendre la rhéologie, EDP Sciences, France, 220 p.

Cui W., Mazza G., Biliaderis C.G., 1994. Chemical structure, molecular size distributions and rheological properties of flaxseed gum. *Journal of Agricultural and Food Chemistry.*, vol.42, pp. 1891–1895.

Cui W., Mazza G., Oomah B.D., Biliaderis C.G., 1994. “Optimization of an Aqueous Extraction Process of Flax-seed Gum by Response Surface Methodology”. *LWT— Food Science and Technology*, Vol.27, n.4, pp. 363-369. DOI:10.1006/fstl.1994.1074

Cui W., Kenaschuk E., Mazza G., 1996. Influence of genotype on chemical composition and rheological properties of flaxseed gums. *Food Hydrocolloids*, vol.10, pp. 221-227.

Cunnane S.C., Ganguli S., Menard C., Liede A.C., Hamadeh M.J., Chen Z.Y., Wolever T.M. S., Jenkins D.J.A., 1993. High linolenic acid flaxseed (*Linum usitatissimum*): some nutritional properties in humans. *Br. J. Nutr.*, vol.69, pp.443–453.

Cunnane S.C., Hamadeh M.J., Liede A.C., Thompson L.U., Wolever T.M.S., Jenkins D.J.A., 1994. Nutritional attributes of flaxseed in healthy young adults. *Am. J. Clin. Nutr.*, vol.61, pp.62–68.

Czemplik M., Boba A., Kostyn K., Kulma A., Mituła A., Sztajnert M., Wróbel- Kwiatkowska M., Żuk M., Szopa J., Skórkowska-Telichowska K., 2011. Flax Engineering for Biomedical Application. *Biomedical Engineering, Trends, Research and Technologies*, Chap. 17, pp.407-434.

D

Daily Australia, 2013. Types of Yogurt. [online] Available at: <<http://www.dairyaustralia.com.au/Dairy-food-and-recipes/Dairy-Products/Yogurt/Types-of-Yogurt.aspx>> [Accessed 2 December 2013].

Dairy Goodness, 2013. Types of yogurt. [online] Available at: <<http://www.dairygoodness.ca/yogurt/types-of-yogurt>> [Accessed 2 December 2013].

Dairy UK, 2009. Code of practice for the composition and labeling of yogurt. London: W1U 6QQ.

Daniel Christine et Roudot Alain-Claude, 2007. La terminologie de la texture des aliments. *Meta.*, vol.52, n.2, pp.342–351. [https:// doi.org/10.7202/016075ar](https://doi.org/10.7202/016075ar)

Daun J.K., 1993. Flaxseed. pp. 853 to 860 In: *Grains and Oilseeds*, 4th ed., vol. 2, Canadian International Grains Institute, Winnipeg, MB.

- Daun J., Barthet V., Chornick T., Duguid S., 2003.** Structure, composition, and variety development of flaxseed. *dans: Flaxseed in Human Nutrition, Second Edition*. Eds. Thompson L. U. and Cunnane S. C., AOCS Press, Champaign, Illinois, USA, pp.1-40.
- Davis J.G., 1971.** Enumeration and viability of *L. bulgaricus* and *St. thermophilus* in yogurts, *Dairy Industry*. vol.36, pp.569-573.
- De Filippis A.P., Sperling L.S., 2006.** Understanding omega-3's. *American Heart Journal*, vol.151, n.3, pp.564-570.
- Delikanli B. et Ozcan T., 2014.** Effects of various whey proteins on the physicochemical and textural properties of set type nonfat yoghurt. *Int. J. Dairy Technol.*, vol.67, pp.495–503.
- Dellaglio F., De Rossart H., Torriani S., Curk M. Et Janssens D., 1994.** Caractérisation générale des bactéries lactiques. Tec. &Doc., Eds. Loriga, vol.1, pp. 25-116.
- DeLorenzi L., Priel S., Torriano G., 1995.** Rheologie behavior of low-fat and full-fat stirred yoghurt. *International Dairy Journal*, vol.5, pp.661-671.
- De Lorgeri I.M., Salen P., Laporte F., De Leiris J., 2001.** Alpha-linolenic acid in the prevention and treatment of coronary heart disease. *Eur. Heart J. Suppl.*, vol.3, pp.26–32.
- Deng Qianchun, Yu Xiao, Ma Fangli, Xu Jiqu, Huang Fenghong, Huang Qingde, Sheng Feng, 2018.** Comparative analysis of the in-vitro antioxidant activity and bioactive compounds of flaxseed in China according to variety and geographical origin. *International Journal of Food Properties*. DOI: 10.1080/10942912.2017.1402029
- Dieken H., 1992.** Use of flaxseed as a source of omega-3 fatty acids in human nutrition. *Proc. Flax Inst.*, vol.54, pp.1–4.
- Doleyres Y., 2003.** Production en conteneur du ferment lactique probiotique par la technologie des cellules immobilisées. Thèse de doctorat. Université de Laval, Québec, 167 p.
- Dönmez Özge, Ataç Mogol Burçe, Gökmen Vural, 2017.** Syneresis and rheological behaviors of set yogurt containing green tea and green coffee powders. *J. Dairy Sci.*, vol. 100, pp.1–7. DOI.org/10.3168/jds.2016-11262
- Dowden A., 2013.** The good yoghurt guide. Daily Mail, [online] 4 December. Available at: <<http://www.dailymail.co.uk/health/article-19005/The-good-yoghurt-guide.html>> [Accessed 4 December 2013].
- Driessen F., 1981.** In Mixed Culture Fermented. In. Les produits laitiers 2eme ed., Jeantet R., Croguenec T., Mahaut M., Shuck P., Brule G. Ed. Tec & Doc. Paris.

Driessen F.M., et Kingma F., 1982. Stand houders J. Evidence that *Lactobacillus bulgaricus* in yogurt is stimulated by carbon dioxide produced by *Streptococcus thermophilus*, *Netherland Milk Dairy Journal*, vol.36, pp.135-144.

Duboc P., Mollet B., 2001. Applications of exopolysaccharides in the dairy industry. *Int. Dairy J.*, vol.11, pp.759–768. doi:10.1016/S0958-6946 (01)00119-4

Dubois V., Breton S., Linder M., Fanni J., Parmentier M., 2007. Fatty acid profiles of vegetable oils with regard other nutritional potential. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.*, vol.109, pp.710–732.

Du H., 2010. Dietary fiber and subsequent changes in body weight and waist circumference in European men and women. *American Journal of Clinical Nutrition*, vol.9, pp. 329–336.

Dybing C. D., Zimmerman D. C., 1965. Temperature effects on Flax (*Linum Usitatissimum L.*) growth, seed production and oil quality in controlled environments. *Crop Science*, vol.5, pp.184-187.

E

Eastwood M.A., Passmore R., 1983. DIETARY FIBRE. *The Lancet*, vol.322, pp. 202-206. DOI.org/10.1016/S0140-6736(83)90183-6.

Eck A. et Gillis J.C., 1997. Le fromage—de la science à l’assurance-qualité. Eck A., Gillis J. (Eds.). Lavoisier. New York.

EFSA, 2010. Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA); Scientific Opinion on the substantiation of health claims related to Yoghurt cultures and improving lactose digestion (ID 1143, 2976) pursuant to Article 13(1) of Regulation (EC) No 1924/2006. *EFSA Journal* 2010, vol.8, n.10 :1763. [18 pp.]. doi:10.2903/j.efsa.2010.1763. Available online: www.efsa.europa.eu/efsajournal.htm.

Elfak A. M., Pass G., Phillips G. O., Morley R. G., 1977. The viscosity of dilute solutions of guar gum and locust bean gum with and without added sugars. *J. Sci. Food Agric.*, vol.28, pp.895-899.

Emeje M., Isimi Ch., Byrn S., Fortunak J., Kunle O., Ofoefule S., 2011. Extraction and Physicochemical Characterization of a New Polysaccharide Obtained from the Fresh Fruits of *Abelmoschus Esculentus*, *Iranian Journal of Pharmaceutical Research*, vol.10, n.2, pp. 237-246.

Epaminondas P.S., Araujo K.L.G.V., Lima de Souza A., Silva M.C.D., Queiroz N., Souza A.L., Soledade L.E.B., Santos I.M.G., Souza A.G., 2011. Influence of toasting on the nutritious and thermal properties of flaxseed. *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol.106, pp.551–555. DOI: 10.1007/s10973-011-1638-y.

Erdman J.W., 1979. Oilseed phytates: nutritional implications. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, vol.56, pp.736–741.

Ernest J.M., 1990. Youghurts, part 1. *Dairy Industries International*, vol.55, pp.40-41.

Espírito Santo A. P., Cartolano N. S., Silva T. F., Soares F. A. S. M., Gioielli L. A., Perego P. et al., 2012a. Fibers from fruit by-products enhance probiotic viability and fattyacids profile and increase CLA content in yogurts. *International Journal of Food Microbiology*, vol.154, pp. 135–144.

Espírito-Santo A. P., Perego P., Converti A., and Oliveira M. N., 2012b. Influence of milk type and addition of passion fruit peel powder on fermentation kinetics, texture profile and bacterial viability in probiotic yogurts. *LWT - Food Science and Technology*, vol.47, n.2, pp. 393–399.

Espírito-Santo A.P., Lagazzo A., Sousa A.L.O.P., Perego P., Converti A., Oliveira Maricê N., 2013. Rheology, spontaneous whey separation, microstructure and sensorial characteristics of probiotic yoghurts enriched with passion fruit fiber. *Food Research International*, vol. 50, pp.224–231.

Everett D.W., McLeod R.E., 2005. Interactions of polysaccharide stabilizers with casein aggregates in stirred skim-milk yogurt. *International Dairy Journal*, vol.15, n.11, pp.1175–1183.

F

Faerber J., 2004. Microscopie électronique à balayage Microanalyse X par sonde électronique. Institut de physique et de chimie des Matériaux de Strasbourg (IPCMS), 53p.

Fagan C.C., O'Donnell C.P., Cullen P.J., et Brennan C.S., 2006. The effect 506 of dietary fiber inclusion on milk coagulation kinetics. *Journal of Food Engineering*, vol.77, n.2, pp.261-268.

FAO, 1995. Le lait et les produits laitiers dans la nutrition humaine. Collection FAO : Alimentation et nutrition, n.28.

FAO, 2012. Guide pratique - Stockage et conservation des grains à la ferme. Site consulté le 13 mars 2012, www.fao.org/Wairdocs/X5163F/X5163f02.htm.

FAO, 2015 sur <https://www.gastronomiac.com/glossaire-des-produits/lin-description-du-lin-historique-du-lin-et-production-mondiale-de-la-graine-de-lin/>

FAOSTAT, 2012. <http://faostat3.fao.org/home/index.html>. Accessed 01.09.14.von Gadow A., Joubert E., & Hansmann C. F. (1997). Comparison of the antioxidantactivity of aspalathin with that of other plant phenols of rooibos tea (*Aspalathus linearis*), a-tocopherol, BHT, and BHA. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol.45, pp. 632-638.

Farkye N.Y et Imafidon G.I., 1995. Thermal denaturation of indigenous milk enzymes. *In* Heat-induced changes in milk, 2nd Ed. pp. 331-345. ed. Fox, P.H., International Dairy Federation, Brussels.

Farooq H. et Haque Z.U., 1992. “Effect of sugar esters on the textural properties of nonfat low calorie yoghurt”. *J. Dairy Sci.*, vol. 75, pp. 2676-2680.

FDA, 2013. Yogurt. 21 CFR 131.200, Code of Federal Regulations. U. S. Dept. of Health and Human Services, Washington, DC.

Fedeniuk et Biliaderis, 1994. Composition and physicochemical properties of linseed (*Linum usitatissimum L.*) mucilage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol.42, n.2, pp.240-247.

Feng D., Shen Y., Chavez E.R., 2003. Effectiveness of different processing methods in reducing hydrogen cyanide content of flaxseed. *J. Sci. Food Agric.*, vol.83, p.836–841.

Ferdousi R., Rouhi M., Mohammadi R., Mortazavian A. M., Khosravi-Darani K., Homayouni Rad A., 2013. Evaluation of probiotic survivability in yogurt exposed to cold chain interruption. *Iranian Journal of Pharmaceutical Research*, vol.12, pp.139-144.

Fernald M.L., 1950. Gray's Manual of Botany. Eight edition (Corrected Printing, R.C. Rollins, Document de biologie BIO1994-10 10 1970). D.Van Nostrand Company, New York, NY. 1632 p.

Fiorda Fernanda Assumpção, Vinicius de Melo Gilberto, Thomaz-Soccol Vanete, Medeiros Adriane Pedroni, Rakshit Sudip Kumar, Soccol Carlos Ricardo, 2016. Development of kefir-based probiotic beverages with DNA protection and antioxidant activities using soybean hydrolyzed extract, colostrum and honey. *LWT - Food Science and Technology*. DOI: 10.1016/j.lwt.2016.01.003.

Fischer P., Pollard M., Erni P., Marti I., Padar S., 2009. Rheological approaches to food systems. *Comptes Rendus Physique*, vol.10, pp.740–750.

Fizmann S. M. et Duran L., 1989. Mechanical properties of kappa-carrageenan – locust bean gum mixed gels with added sucrose, *Food Hydrocolloids*, vol.3, pp.209-216.

Fizman S. M., Lluch M. A., Salvador A., 1999. Effect of addition of gelatine on microstructure of acidic milk gels and yoghurt and on their rheological properties. *International Dairy Journal*, vol.9, pp.895-901.

Flax council of Canada, 2015. <http://flaxcouncil.ca/> (Consulted on 2016-03-16).

Flejtas O. et Gruev P., 1977. Comparative performance of industrial and new isolated strains of *L. bulgaricus* with respect to acid formation properties, *Scientific works of HIFFI*, vol.24, n.1 (in Bulgarian).

Folkenberg D.M., Martens M., 2003. Sensory properties of low fat yoghurts. Part A: Effect of fat content, fermentation culture and addition of non-fat dry milk on the sensory properties of plain yoghurts. *Milchwissenschaft-Milk Science International*, vol.58, n.1-2, p.48-51.

Frankel E. N., 1998. Lipid oxidation, pp. 13-41 in Frankel E. N., ed. Lipid oxidation. The Oil Press, Dundee, UK.

Fredot E., 2005. Connaissance des aliments –Bases alimentaires et nutritionnelles de la diététique. Paris, London, Newyork. Edition TEC et DOC, 397 p.

Freeman T. P., 1995. Structure of flaxseed. dans: *Flaxseed in human nutrition*. Eds. Cunnane S. C., Thompson, L. U., AOCS Press, Champaign, Illinois, USA, p. 11–21.

Fukumitsu S., Aida K., Shimizu H., Toyoda K., 2010. Flaxseed lignin lowers blood cholesterol and decreases liver disease risk factors in moderately hypercholesterolemic men. *Nutr. Res.*, vol.30, pp.441–446.

G

Gabor H. et Abraham S., 1986. Effect of dietary menhaden oil on tumor cell loss and the accumulation of mass of a transplantable mammary adenocarcinoma in BALB/c mice. *J. Natl. Cancer. Inst.*, vol. 76, pp.1223–1231.

Gad A.S., Kholif A.M., Sayed A.F., 2010. Evaluation of the Nutritional Value of Functional Yogurt Resulting from Combination of Date Palm Syrup and Skim Milk. *American Journal of Food Technology*, vol.5, n.4, pp. 250-259.

Gaiani Claire, 2006. Étude des mécanismes de réhydratation des poudres laitières : influence de la structure et de la composition des poudres. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine, 230p.

Ganorkar P. M., Jain R. K., 2013. Flaxseed-a nutritional punch. *Int. Food Res. J.*, vol. 20, pp.519–525.

Garcia Martínez M., Sanchez Segarra P.J., Gordillo Otero M.J., Amaro Lopez M.A., Moreno-Rojas R., 1998. Valoracion nutricional de la composicion mineral de yogures enteros aromati-zados. *Alimentaria*, vol.297, pp.73-76.

Garcia-Perez F.J., Lario Y., Fernandez-Lopez J., Sayas E., Perez-Alvarez J.A., Sendra E., 2005. Effect of orange fiber addition on yogurt color during fermentation and cold storage. *Color Res. Appl.*, vol.30, pp.457-63. Doi:10.1002/col.20158

Gatel R., 1982. L'aliment à humidité intermédiaire concept fondamental et fiction scientifique, APRIA, pp. 39-50.

Gee V.L., Vasanthan T., Temelli F., 2007. Viscosity of model yogurt systems enriched with barley β -glucan as influenced by starter cultures. *Int. Dairy. J.*, vol.17, pp.1083–1088.

GEMRCN (Groupe d'Étude des Marchés de Restauration Collective et de Nutrition), 2009. Specification Technique De L'achat Public : Laits Et Produits Laitiers, 47p.http://www.minefe.gouv.fr/directions_services/daj/guide/gpem/table.html

Geneau-Sbartai C., Leyris J., Silvestre F., Rigal L., 2008. Sunflower cake as a natural composite: composition and plastic properties. *J. Agric. Food Chem.*, vol.56, pp.198–208.

Geves, 2012. Centre d'Etudes et de Contrôle des Variétés et des Semences. Site consulté le 13 mars 2012, <http://cat.geves.info/page/ListeNationale>.

GFR, 1990. Dictionnaire de rhéologie, Français – Anglais – Allemand – Espagnol, Groupe Français de Rhéologie, Institut de Mécanique des Fluides, Toulouse, France.

Gibson G.R., Probert H.M., Van Loo J., Rastall R.A., Roberfroid M.B., 2004. Dietary modulation of the human colonic microbiota: updating the concept of prebiotics. *Nutrition Research Reviews*, vol.17, n.2, pp.259-275.

Giddey, C., 1982. Les produits à humidité intermédiaire. Cas particulier du problème de la conservation des produits à humidité intermédiaire. APRIA, pp. 21-28.

Gonzalez M.J., Schemmel R.A., Gray J., Dugan L., Sheffield L.G., Welsch C.W., 1991. Effect of dietary fat on growth of MCF-7 and MDAMB231 human breast carcinomas in athymic nude mice: relationship between carcinoma growth and lipid peroxidation product levels. *Carcinogenesis*, vol. 12, p.1231–1235.

Goodness Direct, 2013. Fruit and Flavored yogurt. [online] Available at: <http://www.goodnessdirect.co.uk/cgi-local/frameset/sect/CDYF> Fruit-Flavoured_Yogurt.html [Accessed 30 November 2013].

Goonaratna C., and Sooriyarachchi M. R., 2012. The effect of a herbal formulation on the incidence and severity of upper respiratory symptoms in healthy volunteers: an open-label, randomised controlled clinical trial. *Ceylon Medical Journal*, vol.57, n.1, pp. 19-32.

Gopalan C., Sastri S.B.V. Balasubramanian S., 2007. Nutritive value of Indian food, National Institute of nutrition (NIN), ICM, India.

Goyal A., Sharma V., Upadhyay N., Gill S., Sihag M., 2014 Flax and flaxseed oil: An ancient medicine & modern functional food. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, vol 51, n.9, pp.1633-53. DOI: 10.1007/s13197-013-1247-9.

Green M.L., 1987. Effect of manipulation of milk composition and curd forming conditions on the formation, structure and properties of milk curd. *J. Dairy Res.*, vol.54, pp. 303-313.

Grossiord J.L., Couarraze G., 2000. Initiation à la rhéologie. 3ème édition. Tec & Doc Lavoisier, 300p.

Guarner F., Perdigon G., Corthier G., Salminen S., Koletzko B., Morelli L., 2005. Should yoghurt's cultures be considered probiotic? *British Journal of Nutrition*, vol. 93p.783-786. Décret N° 88-1203 du 30 décembre 1988 relatif aux laits fermentés et au yaourt ou yoghurt.

Guillou H., Pelissier J.P., Grappin R., 1986. Méthodes de dosage des protéines du lait de vache. Le Lait, INRA Editions, vol.66, n.2, pp.143-175.

Guirguis N., Broome M. C, Hickey M. W., 1984. The effect of partial replacement of skim milk powder with whey protein concentrate on the viscosity and syneresis of yoghurt. *Australian Journal of Dairy Technology*, vol. 39, pp. 33-35.

Guzmán-González M., Morais F., Ramos M., Amigo L., 1999. Influence of skimmed milk concentrate replacement by dry dairy products in a low fat set-type yoghurt model system. I: Use of whey protein concentrates, milk protein concentrates and skimmed milk powder. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol.79, n.8, pp.1117- 1122.

H

Hall C. I., Tulbek M. C., Xu Y., 2006. Flaxseed. *Advances in Food and Nutrition Research*, vol. 51, pp. 1-97.

Halliwell B., Gutteridge J. M., 1999. Free radicals in biology and medicine (3rd Ed.). Oxford: Oxford University Press.

Hamrick I. et Counts S.H., 2008. Vitamin and mineral supplements. *Wellness Prevent.*, vol.35, pp.729-747.

Hansen P. M. T., 1993. Food Hydrocolloids in the dairy industry. In Nishinari K., et Doi E. Eds Food Hydrocolloids. Springer, Boston, MA. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2486-1_32.

- Harris R.K., Haggerty W.J., 1993.** Assays for potentially anticarcinogenic phytochemicals in Flaxseed, *Cereal foods world*, vol.38, pp.147-151.
- Hasani S., Khodadadi I., Heshmati A., 2016.** Viability of *Lactobacillus acidophilus* in rice bran-enriched stirred yoghurt and the physicochemical and sensory characteristics of product during refrigerated storage. *International Journal of Food Science & Technology*, vol.51, n.11, pp.2485-2492.
- Hassan A. N., Frank J. F., Farmer M. L., Schmidt K. A., Shalabi S.I., 1995.** Observation of encapsulated lactic acid bacteria using confocal scanning laser microscopy. *Journal of Dairy Science*, vol.78, pp.2624- 2628.
- Hatano T., Kagawa H., Yasuhara T., Okuda T., 1988.** Two new flavonoids and other constituents in licorice root: their relative astringency and radical scavenging effects. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, vol. 36, pp. 2090– 2097.
- Heertje I., Visser J., Smits P., 1985.** Structure formation in acid milk gels. *Food Microstructure*, vol. 4, pp.267-277.
- Helal A., Rashid N.N., Dyab N.E., Otaibi M.A., Alnemr T.M., 2018.** Enhanced Functional, Sensory, Microbial and Texture Properties of Low-Fat Set Yogurt Supplemented With High-Density Inulin. *J. Food Processing & Beverages*, vol.6, n.1, pp.1-11.
- Hellinga C., Somsen D. J., Koenraads J. P. J. M., 1986.** Viscosity of stirred yoghurt: modern techniques useful in analysing and improving routine measurements. *Netherlands Milk Dairy Journal*, vol. 40, pp. 217-240.
- Hess S. J., Roberts R. F., Ziegler G. R., 1997.** Rheological properties of nonfat yogurt stabilized using *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* producing exopolysaccharide or using commercial stabilizer systems. *Journal of Dairy Science*, vol. 80, pp.252-263.
- Hill D.J., Haywood A.M., Lunt D.J., Hunter S.J., Bragg F.J., Contoux C., Stepanek C., Sohl L., Rosenbloom N.A., Chan W-L., Kamae Y., Zhang Z., Abe-Ouchi A., Chandler M.A., Jost A., Lohmann G., Otto-Bliesner B.L., Ramstein G., Ueda H., 2014.** Evaluating the dominant components of warming in Pliocene climate simulations. *Clim. Past*, vol.10, pp.79-90. DOI:10.5194/cp-10-79-2014.
- Hirano R., Hirano M., Oooka M., Hatanaka K., 1998.** Effects of lactoperoxidase on gelation properties of yogurt. *Food Research International*, vol. 31, n.1, pp.1-9.
- Horne D.S., 1998.** Casein interactions: casting light on the Black Boxes, the structure in dairy products. *Int. Dairy J.*, vol.8, n.3, pp. 171-177.

Hosseinian F.S., Beta T., 2009. Patented techniques for the extraction and isolation of secoisolariciresinol diglucoside from flaxseed. *Recent Patents Food Nutr. Agric.*, vol. 25, pp. 25–31.

Hu C., Yuan Y.V., Kitts D.D., 2007. Antioxidant activities of the flaxseed lignin secoisolariciresinol diglucoside, its aglycone secoisolariciresinol and the mammalian lignans enterodiol and enterolactone in vitro. *Food Chem. Toxicol.*, vol. 45, p. 2219–2227.

Huang S., Milles D., 1996. Gamma-linolenic acid: Metabolism and its roles in nutrition and medicine. Champaign, IL, AOCS Press.

Huang S., Ziboh A., 2001. Gamma-linolenic acid: Recent advances in biotechnology and clinical applications. Champaign, IL, AOCS Press.

Hung P. V., Hatcher D. W., Barker W., 2011. Phenolic acid composition of sprouted wheats by ultra- performance liquid chromatography (UPLC) and their antioxidant activities. *Food Chemistry*, vol.126, pp.1896–1901.

Hutchins A.M., Slavin J.L., 2003. Effects of flaxseed on sex hormone metabolism. In: Thompson L.U., Cunnane SC (eds) Flaxseed in human nutrition, 2nd edn. AOCS Press, Champaign, pp. 126–149.

I

IDF/ISO/AOAC Standard 150:1991. Yogurt: Determination of titratable acidity. International Dairy Federation, Brussels, Belgium.

IDF/ISO Standard 117:2003b. Yogurt: Enumeration of characteristic microorganisms, Colony Count Technique at 37°C. International Dairy Federation, Brussels, Belgium.

Imhof R., Glättli H., Bosset J.O., 1994. Volatile organic aroma compounds produced by thermophilic and mesophilic mixed strain dairy starter cultures. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, vol.27, pp.442-449.

Instituto Adolfo Lutz, 2005. Métodos físicoquímicos para análise de alimentos. 4. ed. Brasília, DF, pp. 819-877.

Iserin P. et al., 2001. La rousse encyclopédie des plantes médicinales. 2éditions.rue de Montparnasse, Paris, 335 p.

Izadi Zahra, Nasirpour Ali, Ghasemali Ali Garoosi, Tamjidi Fardin, 2015. Rheological and physical properties of yogurt enriched with phytosterol during storage. *Food Sci. Technol.*, vol.52, n.8, pp.5341–5346. DOI 10.1007/s13197-014-1593-2

J

- Jaccot, B., Campillo, B., 2003.** Nutrition humaine. Ed. MASSON, Paris, 311 p.
- Jaziri I., Ben Slama M., Mhadhbi H., Urdaci M.C., Hamdi M., 2009.** Effect of green and black teas (*Camellia sinensis* L.) on the characteristic microflora of yogurt during fermentation and refrigerated storage. *Food Chem.*, vol. 112, pp. 614-620.
- Jenkins D.J.A., Wolever T.M.S., Kalmusky J., 1987.** Low glycemic index diet in hyperlipidemia: use of traditional starchy foods. *Am. J. Clin.Nutr.*, vol. 46, pp. 66–71.
- Jing P., Noriega V., Schwartz S. J., et Monica Giusti M., 2007.** Effects of growing conditions on purple corn cob (*Zea mays* L.) anthocyanins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol.55, pp.8625–8629.
- Johnsson P., Kamal-Eldin A., Lundgren L.N., Aaman P., 2000.** HPLC method for analysis of secoisolariciresinol diglucoside in flaxseeds. *J. Agric. Food Chem.*, vol. 48, pp. 5216–5219.
- Johnsson P., Peerlkamp N., Kamal-Eldina A., Anders- son R. E., Andersson R., Lundgren L.N., Aman P., 2002** Polymeric fractions containing phenol glucosides in flaxseed. *Food Chem.*, vol. 76, pp. 207-212.
- Jolly A., Dobson A., Rasamimanana H.M., Walker J., O'Connor S., Solberg M., Perel V., 2002.** Demography of Lemur catta at Berenty Reserve, Madagascar: effects of troop size, habitat and rainfall. *Int. J. Primatol.*, vol. 23, pp. 327–353
- Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology, 2006.** New Food Analysis Methods. Tokyo: Korin Co. Ltd. p. 68-73.
- Juillard V., Desmazeaud M.J., Spinnler H.E., 1988.** Demonstration of urease activity in *Streptococcus thermophilus*. *Canadian Journal of Microbiology*, vol.34, pp.818-822.
- Juillard V., Helinck S., Flambard B., Foucaud C., 1998.** Richard J. Amino acid supply of *Lactococcus lactis* during growth in milk. *Recent Research Developpement in Microbiology*, vol.2, pp.233-252.
- Jung H.C., 2002.** Effect of adding various gums on the quality and the physical chemical characteristics of cow's milk yoghurt. *J. Taiwan Livest. Res.* Vol.35, pp.351–356.
- Ju Noh Hyo, Seo Min Hye, Lee Jun Ho, Chang Yoon Hyuk, 2013.** Physicochemical and Sensory Properties of Yogurt Supplemented with *Corni fructus* during Storage. *Preventive Nutrition and Food Science*, vol. 18, n. 1, pp. 45-9. DOI:10.3746/pnf.2013.18.1.045.

K

- Kadivar M., 2001.** Studies on integrated processes for the recovery of mucilage, hull, oil and protein from Solin (low linolenic acid flax). PhD, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, p. 177.

Kalab M., Emmons D.B., Sargant A.G., 1976. Milk gel structure V: Microstructure of yoghurt as related to the heating of milk. *Milchwissenschaft*, vol.31, pp.402-408.

Kamal-Eldin A., Peerlkamp N., Johnsson P., Andersson R., Andersson R.E., Lundgren L.N., Raffaelli B., Hoikkala A., Leppala E., Wahala K., 2002. Enterolignans. *J.Chromatogr.*, vol. 777, pp. 29–43.

Kapoor S., Sachdeva R., Kochhar A., 2011. Flaxseed: a potential treatment of lowering blood glucose and lipid profile among diabetic females. *Ind. J. Nutr. Diet*, vol. 48, pp. 529–536.

Karimi R., Mortazavian A.M., Da Cruz A.G., 2011. Viability of probiotic microorganisms in cheese during production and storage: a review. *Dairy Science & Technology*, vol.91, n.3, pp.283-308.

Kashgari Mahmud, Etkisindeki Islam, Edebiyati Turk. Encyclopaedia Britannica.

Kaur Rajwinder, Kaur Maninder, Singh Gill Balmeet, 2017. Phenolic acid composition of flaxseed cultivars by ultra-performance liquid chromatography (UPLC) and their antioxidant activities: Effect of sand roasting and microwave heating. *J Food Process Preserv.*, vol.131, pp.1-8.
DOI.org/10.1111/jfpp.13181

Kermiche F., Boulekbache –Makhlouf L., Felix M., Harkat-Madouri L., Remini H., Madani K., Romero A., 2018. Effects of the incorporation of cantaloupe pulp in yogurt: Physicochemical, phytochemical and rheological properties. *Food Science and Technology International*, pp. 1–13.
DOI 10.1177/1082013218776701

Kessler H. G., 1998. The structure of fermented milk products as influenced by technology and composition. In *Texture of fermented milk products and dairy dessert*. Proceedings of the IDF Symposium. Vicenza, Italy, 5-6, May 1997, pp. 93-105.

Kiros E., Seifu E., Bultosa G., Solomon W., 2016. Effect of carrot juice and stabilizer on the physicochemical and microbiological properties of yogurt. *LWT-Food Science and Technology*, Vol. 69, pp.191-196.

Kitts D., Yuan Y., Wijewickreme A., Thompson L., 1999. Antioxidant activity of the flaxseed lignan secoisolariciresinol diglycoside and its mammalian lignan metabolites enterodiol and enterolactone, *Molecular Cell Biochemistry*, vol.202, pp.91–100.

Knörr W., Daute P., Grützmacher R, Höfer R., 1995. Development of new fields of application for linseed oil. *Lipid / Fett.*, vol. 97, pp. 165-9.

Koksoy A., Kilic M. 2004. Use of hydrocolloids in textural stabilization of a yogurt drink, ayran. *Food Hydrocolloids*, vol.18, pp.593-600.

Kondratenko M.S., Gruev P., Mutafova K.P., 1985. *Bulgarian yogurt*, Zemizda (Eds.), Sofia, (in Bulgarian).

Kosikowski F.V., 1982. *Cheese and Fermented Milk Foods*. 2nd edn, F.V Kosikowski and associates, New York, USA.

Kozłowska H., Zadernowski R., Sosulski F.W., 1983. Phenolic acids in oilseed flours. *Nahrung*, vol.27, pp.449-453.

Krajcova A., Schulzova V., Hajslova J., Bjelkova M., 2009. Lignans in flaxseed. *Czech. J. Food Sci.*, vol. 27, pp.252–255.

Kramme D.G., Griffen R.H., Hartford C.G., Corrado J.A., 1973. Automated Kjeldahl Nitrogen determination. A comprehensive method for aqueous dispersible samples. *Anal. Chem.*, vol.45, pp.405-408.

Krasaekoopt W., Bhatia S., 2012. Production of Yogurt Powder Using Foam-Mat Drying. *AU Journal of Technology*, vol. 15, n. 3, pp. 166-171.

Kremer J.M., 2000. N-3fatty acid supplements in rheumatoid arthritis. *Am. J. Clin. Nutr.*, vol. 71, pp. 349S–351S.

Kristensen M., Jensen M.G., Aarestrup J., Petersen K.E.N., Sondergaard L., Mikkelsen M.S, Du H. et al., 2010. Dietary fiber and subsequent changes in body weight and waist circumference in European men and women. *Am. J. Clin.Nutr.*, vol. 91, pp. 329–336.

Kroger M., 1976. Quality of yogurt. *J. Dairy Sci.*, vol. 59, pp. 344-50.

Kupeli Nuriye, Norton Sam, Chilcot Joseph, Schmidt Ulrike H., Campbell Iain C., Troop Nicholas A., 2014. A Confirmatory Factor Analysis and Validation of the Vulnerable Attachment Style Questionnaire. *J. Psychopathol Behav Assess.* DOI 10.1007/s10862-014-9432-3

ℒ

Labalette F., Landé N., Wagner D., Roux-Duparque M., Saillet E., Onidol, 2011. La filière lin oléagineux française : panorama et perspectives. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides*, vol. 8, pp. 113-122.

Lagoueyte N., Lablee J., Lagaude A. Et Tarodo De La Fuente B., 1994. Temperature Affects Microstructure of Renneted Milk Gel. *Journal of Food Science*, vol.59, n. 5, pp.956-959.

Lamontagne M., 2002. Produits laitiers fermentes. Science et Technologie du Lait : transformation du lait. Presses Internationales Polytechnique, Quebec, pp. 417–469.

Lamoureux L., 2000. Exploitation de l'activité β - galactosidase de culture de bifidobacteries en vue d'enrichir des produits laitiers en galacto-oligosaccharides. Memoire de maitrise, Universite de Laval, Canada, p.23-47.

- Larpent J.P. et Bourgeois C.M., 1989.** Microbiologie alimentaire. Ed, techniques et documentation Lavoisier. Paris, vol. 46, p. 1-117.
- Lazaridou A., Vaikousi H., Biliaderis C.G., 2008.** Impact of mixed-linkage β -glucans on physical properties of acid-set skim milk gels. *International Dairy Journal*, vol.18, n.3, pp.312-322.
- Lecoq R., 1965.** Manuel d'analyses alimentaires et d'expertises usuelles. Tome I. Ed. Doin, Deren et Cie, p. 241-251.
- Ledward D., 1993.** Creating textures from mixed biopolymer systems. *Trends in Food Science & Technology*, vol.4, n., 12, pp.402-405.
- Lee W. J., and Lucey J. A., 2003.** Rheological properties, whey separation, and microstructure in set-style yogurt: effects of heating temperature and incubation temperature. *Journal of Texture Studies*, vol.34, n. 5-6, pp. 515-536. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-4603.2003.tb01079.x>.
- Lee S.J., Hwang J.H., Lee S., Ahn J., Kwak H.S., 2006.** Property changes and cholesterol-lowering effect in evening primrose oil-enriched and cholesterol-reduced yogurt. *Int. J. Dairy Technol.*, vol. 60, pp. 22–30.
- Leory F., Degeest B. and DE vust L., 2002.** A novel area of predictive modeling: describing the functionality of beneficial micro-organisms in foods. *International Journal of Food. Microbiology*, vol.73, pp. 251-259.
- Li Xin-yu, Li Dong, Wang Li-jun, Wua Min, Adhikari Benu, 2012.** The effect of addition of flaxseed gum on the rheological behavior of mixed flaxseed gum–casein gels. *Carbohydrate Polymers*, vol. 88, pp.1214–1220.
- Lim Orathai, Suntornsuk Worapot, Suntornsuk Leena, 2009.** Capillary zone electrophoresis for enumeration of *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus* and *Streptococcus thermophilus* in yogurt. *Journal of Chromatography B*. vol. 877, n. 8-9, pp. 710-18. DOI:10.1016/j.jchromb.2009.02.014.
- Lindinger M.I., 1995.** Potassium regulation during exercise and recovery in humans: Implications for skeletal and cardiac muscle. *J. Mol. Cell. Cardiol.*, vol.27, pp. 1011-1022.
- Litwinienko G., Ingold K., 2003.** Abnormal solvent effects on hydrogen atom abstractions. The reactions of phenols with 2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (dpph•) in alcohols. *The Journal of Organic Chemistry*, vol.68, n.9, pp.3433–3438.
- Locke C.A., Stoll A.L., 2001.** Omega-3 fatty acid in major depression. *World Rev. Nutr. Diet*, vol. 89, pp. 173–185.

- Loones A., 1994.** Laits fermentés par les bactéries lactiques. In Bactéries lactiques: Aspects fondamentaux et technologiques. Vol. 2. De Roissart, H. & Luquet, F. M. (Ed.), Loriga, Uriage, pp. 135-154.
- Lopes da Silva F., Escribano-Bailon M. T., Perez Alonso J. J., RivasGonzalo J. C., et Santos-Buelga C., 2007.** Anthocyanin pigments in strawberry. *LWT-Food Science and Technology*, vol.40, pp.374–382.
- Loveday S.M., Sarkar A., Singh H., 2013.** Innovative yoghurts: Novel processing technologies for improving acid milk gel texture. *Trends in Food Science & Technology*, vol.33, n.1, pp. 5-20.
- Lucey J.A., Singh H., 1997.** Formation and physical properties of acid milk gels: A review. *Food Res. Int.*, vol. 30, p. 529-42. DOI.org/10.1016/S0963-9969(98)00015-5.
- Lucey J.A., Singh H., 1998.** Formation and physical properties of acid milk gels: a review. *Food Rev Int.*, vol. 7, pp.529–542.
- Lucey J.A., Tamehana M., Munro P.A., 1998.** A comparison of the formation, rheological properties and microstructure of acid skim milk gels made with a bacterial culture or glucono- δ - lactone. *Food Research International*, vol.31, n. 2, pp.145-155.
- Lucey J.A., Singh H., 1999.** Formation and physical properties of acid milk gels: a review. *Food Research International*, vol.30, n. 7, pp.529-542.
- Lucey J. A., Tamehana M., Singh H., Munro P. A., 1999.** Stability of model acid milk beverage: effect of pectin concentration, storage temperature and milk heat treatment. *Journal of Texture Studies*, vol.30, n.3, pp.305-318.
- Lucey J. A., 2002.** Formation and physical properties of milk protein gels. *J. Dairy Sci.*, vol. 85, pp. 281-94. DOI.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74078-2.
- Lucey J. A., 2004.** Cultured dairy products: an overview of their gelation and texture properties. *International Journal of Dairy Technology*, vol. 57, pp. 77-84
- Luquet F.M., 1985.** Laits et produits laitiers : Transformations et technologies. Ed. Techniques et Documentation, Lavoisier, 633p.
- Luquet F.M. et Carrieu G., 2005.** Bactéries lactiques et probiotiques. Collection sciences et techniques agroalimentaires. Techniques et documentation. Ed. Lavoisier, Paris. 307p.

M

- Macheix J.J., Fleuriet A., Jay-Allemand C., 2005.** Les composés phénoliques des végétaux : un exemple de métabolites secondaires d'importance économique. Ed. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, pp. 4-5.
- MacPhail, P., 2007.** Iron. In: Essentials of Human Nutrition, Mann, J.I. and A.S. Truswell (Eds.). 3rd Edn. Oxford University Press, Oxford, pp. 125-37.

- Madureira A. R., Amorim M., Gomes A. M., Pintado M. E., Malcata F. X., 2011.** Protective effect of whey cheese matrix on probiotic strains exposed to simulated gastrointestinal conditions. *Food Res. Int.*, vol. 44, n. 1, pp. 465-70. DOI.org/10.1016/j.foodres.2010.09.010.
- Madusudhan K.T. et Singh N., 1983.** Studies on linseed proteins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 31, n. 5, pp. 959–963.
- Madhusudan K.T. et Singh N., 1985.** Isolation and characterization of major protein fraction (12 S) of flaxseed proteins. *J. Agric. Food Chem.*, vol. 33, pp. 673–677.
- Mahaut M., Jeantet R., Brulé G., Schuck P., 2000.** Les produits industriels laitiers. Techniques et documentation. Ed. Lavoisier, Paris. pp.26-40.
- Malvern Panalytical:** www.malvernpanalytical.com/fr/products/technology/light_scattering/laser-diffraction.
- Maes M., Smith R., Christophe A., Cosyns P., Desnydes R., Meltzer H., 1996.** Fatty acid composition in major depression: decreased omega 3 fractions in cholesteroyl esters and increased C20:4 omega-6/ C20:5 omega-3 ratio in cholesteroyl esters and phospholipids. *J. Affect Disord.*, vol. 38, pp. 35–46.
- Mariano J. C., Merced J. H. M., Miranda A. J. F., Marcelo P. A., 2011.** Improvement of textural properties of yogurt made from reduced-fat carabao milk by whey protein content adjustment and heat treatment of the milk. *Acta Manilana*, vol.59, pp.19-30.
- Marshall VM., 1987.** Fermented milks and their future trends: I. Microbiological aspects. *J.Dairy Res.*, Vol.54, pp.559. In. Bactéries lactiques et probiotiques, Luquet F-M. et Corrieu G. Ed. Toc & Dec, Paris, 307p.
- Marty-Teyssset C., De La Torre F. and Garel J-R., 2000.** Increased production of hydrogen peroxide by *lactobacillus delbruekii ssp bulgaricus* upon aeration: involvement. *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 66, n. 1, pp. 262-267.
- Matalon M.E., et Sandine W.E., 1986.** *Lactobacillus bulgaricus*, *Streptococcus thermophilus* and yogurt: a review. *Cult. Dairy Prod. J.*, vol.21, pp.6-12.
- Mathias T. R. S., Carvalho Junior I. C., Carvalho C. W. P., Sérvulo E. F. C., 2011.** Rheological characterization of coffee-flavored yogurt with different types of thickener. *Alim. Nutr., Araraquara*, vol. 22, n. 4, pp. 521-529.
- Mathlouthi M., 1996.** Rôle du saccharose dans la rhéologie et la texture des produits sucrés. 5ème Colloque de l'Alliance 7 / CEDUS : La texture des produits sucrés, 11p.

- Matumoto-Pintro P. T., Rabiey L., Robitaille G., and Britten M., 2011.** Use of modified whey protein in yoghurt formulations. *International Dairy Journal*, vol.21, n.1, pp. 21-26. DOI.org/10.1016/j.idairyj.2010.07.003.
- Mazur W., Uehara M., Wahala K., Adlercreutz H., 2000.** Phytoestrogen content of berries, and plasma concentrations and urinary excretion of enterolactone after a single strawberry-meal in human subjects. *Br. J. Nutr.*, vol. 83, pp. 381–387.
- Mazza G. and Biliaderis C. G., 1989.** Functional properties of flaxseed mucilage. *J. Food Sci.*, vol. 54, pp. 1302–1307.
- Mazza G., 2008.** Production, Processing and Uses of Canadian Flax. First CGNA International Workshop, Temuco, Chile, August 3–6.
- Mccann T.H., Fabre F., Day L., 2011.** Microstructure, rheology and storage stability of low-fat yogurt structured by carrot cell wall particles. *Food Res. Int.*, vol.44, pp.884–892.
- Mckinley M. C., 2005.** The nutrition and health benefits of yoghurt. *International journal of dairy technology*, vol. 58, n. 1, pp. 1-12.
- Meghachou W., 2014.** Approche méthodologique à la modélisation par les plans d'expériences pour l'élaboration d'un yaourt. Mémoire de Magister. Université d'Oran. 65 p.
- Meagher L. P., Beecher G. R., Flanagan V. P., Li B. W., 1999.** Isolation and characterization of the lignans, isolariciresinol and pinoresinol, in flaxseed meal. *J. Agric. Food Chem.*, vol. 47, pp. 3173–3180.
- Meagher L.P. et Beecher G.R., 2000.** Assessment of Data on the Lignan Content of Foods. *J. Food Compos. Anal.*, vol. 13, pp. 935-947.
- Michael M., Phebus R. K., Schmidt K. A., 2015.** Plant extract enhances the viability of *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus* and *Lactobacillus acidophilus* in probiotic nonfat yogurt. *Food science & nutrition*, vol.3, n.1, pp.48-55.
- Michel F., Courard L., 2006.** Apport de la granulométrie laser dans la caractérisation physique des fillers calcaires. Septième édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton (RF)2B, 10p.
- Miller G.D., DiRienzo D.D., Reusser M.E., McCarron D.A., 2000.** Benefits of dairy product consumption on blood pressure in humans: A summary of the biomedical literature. *J. Am. Coll. Nutr.*, vol.19. pp. 147-164.
- Minelli Elisa Bertazzoni, Benini Anna, 2008.** Relationship between number of bacteria and their probiotic effects. *Microbial Ecology in Health and Disease*, vol.20, n.4, pp.180-183, DOI: 10.1080/08910600802408095

Ministère du commerce, 1998. <http://www.mincommerce.gov.dz/fichiers/pdfqualite/arr071098fr.pdf>.

Mishra V., Prasad D.N., 2005. Application of in vitro methods for selection of *Lactobacillus casei* strains as potential probiotics. *Int. J. Food Microbiol.*, vol. 103, n. 1, pp. 109-15. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2004.10.047.

Mohammadi-Gouraji E., Soleimanian-Zad S., Ghiaci M., 2018. Phycocyanin-enriched yogurt and its antibacterial and physicochemical properties during 21 days of storage. *LWT - Food Science and Technology*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.057>.

Molina Camila V., Lima Juliana G., Moraes Izabel C.F., Pinho Samantha C., 2018. Physicochemical characterization and sensory evaluation of yogurts incorporated with beta-carotene-loaded solid lipid microparticles stabilized with hydrolyzed soy protein isolate. *Food Sci. Biotechnol.*

DOI: [org/10.1007/s10068-018-0425-y](https://doi.org/10.1007/s10068-018-0425-y)

Molyneux P., 2004. The use of the stable free radical diphenylpicrylhydrazyl (DPPH) for estimating antioxidant activity. *J. Sci. Technol.*, vol.26, n.2, pp. 211-219.

Moreno Rojas R., Canal Ruiz C., Amaro Lopez M. A., Zurera Cosano G., 1993. Contenido mineral del yogur natural. *Alimentaria*, vol.239, pp.81-84.

Morris D.H., 2003. Flax: A health and nutrition primer. 3rd ed, p.11 Winnipeg: Flax Council of Canada. <http://www.jitinc.com/flax/brochure02.pdf>.

Morris M. C., Evans D. A., Tangney C. C., 2005. Relation of the tocopherol forms to incident Alzheimer disease and to cognitive change. *Am. J. Clin. Nutr.*, vol. 81, pp. 508–514.

Morris D. H., 2007. Flax—a health and nutrition primer, PhD, Fourth Edition, Available from: www.flaxcouncil.ca.

Morris H.M., 2007. Flax: A health and nutrition primer. Flax Council of Canada, Winnipeg, Canada, p. 140.

Morton M. S., Chan P. S. F., Cheng C., Blacklock N., Matos-Ferreira A., Abranches-Montero L., Correia R., Lloyd S., GriYths K., 1997. Lignans and isoflavonoids in plasma and prostatic fluid in men: samples from Portugal, Hong Kong, and the United Kingdom. *Prostate*, vol. 32, p. 122–128.

Mottar J., Bassier A., Joniau M., Baert J., 1989. Effet of heat-induced association of whey proteins and casein micelles on yogurt texture. *Journal of Dairy Science*, vol.72, pp.2247-2256.

Mousavi Malihe, Heshmatia Ali, Daraei Garmakhany Amir, Vahidiniaa Aliasghar, Taheria Mehdi, 2019. Optimization of the viability of *Lactobacillus acidophilus* and

physicochemical, textural and sensorial characteristics of flaxseed-enriched stirred probiotic yogurt by using response surface methodology. *LWT - Food Science and Technology*, vol.102, pp.80–88.

Mudgil P., Jumah B., Hamed F., Ahmed M., Maqsood S., 2018. Rheological, micro-structural and sensorial properties of camel milk yogurt as influenced by gelatin. *LWT – Food Science and Technology*. DOI: 10.1016/j.lwt.2018.09.008.

Mueller K., Eisner P., Yoshie-Stark Y., Nakada R., Kirchhoff E., 2010. Functional properties and chemical composition of fractionated brown and yellow linseed meal (*Linum usitatissimum L.*). *J. Food Eng.*, vol. 98, pp. 453–60.

Muir A. D., Westcott N. D., 2003. Flax: The genus *Linum*. CRC Press, London. p. 320.

Muir A. D., 2006. Flax lignans—analytical methods and how they influence our understanding of biological activity. *J. AOAC Int.*, vol. 89, pp. 1147–1157.

Muir A. D., 2010. Flax lignans: New opportunities for functional foods. *Food Sci. Technol. Bull. Funct. Foods*, vol. 6, n. 6, pp. 61-79.

Mullineux G., Simmons M.J.H., 2007. Effects of processing on shear rate of yoghurt. *Journal of Food Engineering*, vol.79, pp.850-857.

Muniandy Premalatha, Bakr Shori Amal, Salihin Baba Ahmad, 2015. Comparison of the effect of green, white and black tea on *Streptococcus thermophilus* and *Lactobacillus spp.* in yogurt during refrigerated Storage. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, vol. 22, pp. 26-30.

Muralikrishna G., Salimath P.V., Tharanathan R.N., 1987. Structural Features of an Arabinoxylan and a Rhamno-galactouronan Derived from Linseed Mucilage. *Carbo-hydrate Research*, vol.161, pp. 265-271.

Murphy P. A. et Hendrich S., 2002. Phytoestrogens in foods. *Adv. Food Nutr. Res.*, vol. 44, pp. 195–246.

N

Nakasaki K., Yanagisawa M., Kobayashi K., 2008. Microbiological quality of fermented milk produced by repeated-batch culture. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. vol. 105, n. 1, pp. 73-76. DOI:10.1263/jbb.105.73.

Narina Satya S. , Hamama Anwar A. Bhardwaj Harbans L., 2012. Nutritional and Mineral Composition of Flax Sprouts. *Journal of Agricultural Science*, vol. 4, n. 11, pp.60-65.

Ngounou C., Ndjouenkeu R., Mbofung F., Noubi I., 2003. Mise en évidence de la biodisponibilité de calcium et de magnésium au cours de la fermentation du lait par des bactéries lactiques isolées du lait caillé du Zébu. *Journal of Food Engineering*, vol.57, pp.301-307.

- Norziah M.H., Kong S.S., Abd Karim A., Seow C.C., 2001.** Pectin-sucrose-Ca²⁺ Interactions: effects on rheological properties. *Food Hydrocolloids*, vol.15, pp.491-498.
- Nummi Esa, 2015.** Technology Focus: X-ray Fluorescence (XRF) in Mining. www.thermofisher.com/blog/mining/technology-focus-x-ray-fluorescence-xrf-in-mining/
- O
- Obretenova S.D., 1987.** Selection of strains of *L. bulgaricus* and *S. thermophilus* to obtain yogurt with continuous cultivation. *Food industry*, vol.9, pp.14-30 (in Bulgarian).
- Ogori A.F., Orede V.O., Wakawa L.D., Makinde O.J., 2017.** Phytochemical and mineral content of pulp drink and analogue yoghurt from pretreated balanaites aegyptiaca fruit pulp. *J. Nutr. Health Food Eng.*, vol.6, n.6, pp.195–199.
- Ono T. et Obato T., 1989.** A model for the assembly of bovine casein micelles from F2 and F3. *Journal of Dairy Research*, vol. 56, pp. 453-461.
- O'Neil J. M., Kleyn D. H., Hare L. B., 1979.** Consistency and compositional characteristics of commercial yoghurts. *Journal of Dairy Science*, vol. 62, pp. 1032-1036.
- Oomah B. D., Mazza G., Kenaschuk E. O., 1992.** Cyanogenic compounds in flaxseed. *J. Agric. Food Chem.*, vol. 40, pp. 346–348.
- Oomah B. D., Mazza G., 1993.** Flaxseed proteins—a review. *Food Chemistry*, vol. 48, pp. 109-114.
- Oomah B.D., Kenaschuk E.O., Mazza G., 1995.** Phenolic acids in flaxseed. *J. Agric. Food Chem.*, vol. 43, pp. 2016-2019.
- Oomah B. D., Kenaschuk E. O., Mazza G., 1996a.** Phytic acid content of flaxseed as influenced by cultivar, growing season and location. *J. Agric. Food Chem.*, vol. 44, pp. 2663–2666.
- Oomah B. D., Mazza G., Kenaschuk E. O., 1996b.** Dehulling characteristics of flaxseed. *Lebensm. Wiss. Technol.*, vol. 29, pp. 245–250.
- Oomah B. D., Kenaschuk E. O., Mazza G., 1997.** Tocopherols in flaxseed. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 45, pp. 2076-2080.
- Oomah B. D., Mazza G., 1998.** Compositional changes during commercial processing of flaxseed. *Ind. Crop Prod.*, vol. 9, pp. 29–37.
- Oomah B. D., 2001.** Flaxseed as a functional food source. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 81, n. 9, pp. 889-894.

Oomah, B. D., 2003. Processing of flaxseed fiber, oil, protein, and lignan. *dans: Flaxseed in Human Nutrition, Second Edition*. Eds. Thompson, L. U., Cunnane S. C., AOCS Press, Champaign, Illinois, USA, vol.20, p. 363-387.

Oomah B. D., Der T. J., Godfrey D. V., 2006. Thermal characteristics of flaxseed (*Linum usitatissimum L.*) proteins. *Food Chem.*, vol. 98, pp. 733–741.

Ott A., Fay L. B., Chaintreau A., 1997. Determination and origin of the aroma impact compounds of yoghurt flavor. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol.45, pp.850-858.

Ozer B.H., Robinson R.K., Grandison A. S., Bell A.E., 1998. Gelation properties of milk concentrated by different techniques. *International Dairy Journal*, vol.8, pp.793-799.

Ozturkoglu-Budak S, Akal C, Yetisemiyen A., 2016. Effect of dried nut fortification on functional, physicochemical, textural, and microbiological properties of yogurt. *J. Dairy Sci.*, vol. 99, n. 11, pp. 8511-8523. DOI.org/10.3168/jds.2016-11217.

P

Paci Kora Enkelejda, 2004. Physico-chemical and sensory interactions in stirred and flavored yoghurt: What are the respective impacts on the perception of texture and flavor?. Doctoral thesis. National Agricultural Institute. Paris-grignon, 205p.

Paci Kora E., Souchon I., Latrille E., Martin N., Marin M., 2004. Composition rather than viscosity modifies the aroma compound retention of flavored stirred yogurt. *Journal of Agriculture and Food Chemistry.*, vol. 52, pp. 3048-3056.

Pandurang Marpalle, Sachin K. Sonawane, Shalini Subhash Arya, 2014. Effect of flaxseed flour addition on physicochemical and sensory properties of functional bread. *LWT - Food Science and Technology*, pp.1-6. DOI.org/10.1016/j.lwt.2014.04.003.

Pang Zhihua, Xu Ruolin, Luo Tianqi, Che Xianing, Bansal Nidhi, Liu Xinqi, 2018. Physicochemical properties of modified starch under yogurt manufacturing conditions and its relation to the properties of yogurt. *Journal of Food Engineering*. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2018.10.003.

Parejo I., Viladomat F., Bastida J., Rosas-Romero A., Flerlage N., Burillo J., Codina C., 2002. Comparison between the radical scavenging activity and antioxidant activity of six distilled and non-distilled mediterranean herbs and aromatic plants. *J Agric Food Chem.*, vol.50, pp.6882-6890.

Pasephol Tatdao, Small Darryl M., Sherkat Frank, 2008. Rheology and texture of set yogurt as affected by inulin addition. *Journal of Texture Studies*, vol.39, pp.617–634.

Pashkova Galina, 2009. X-ray Fluorescence Determination of Element Contents in Milk and Dairy Products. *Food Analytical Methods*, vol. 2, pp. 303–310 DOI 10.1007/s12161-009-9080-5.

Payne T.J., 2000. Promoting better health with flaxseed in bread. *Cereal Foods World*, vol. 45, n. 3, pp. 102–104.

Pelaes Vital AC, Akie Goto P, Hanai LN, Gomes-da-Costa SM, De Abreu Filho BA, Nakamura CV, et al., 2015. Microbiological, functional and rheological properties of low fat yogurt supplemented with *Pleurotus ostreatus* aqueous extract. *LWT - Food Science and Technology.*, vol. 64, n. 2, pp. 1028-1035. DOI.org/10.1016/j.lwt.2015.07.003.

Pella D., Dubnov G., Singh R. B., Sharma R., Berry E. M., 2003. Effects of an Indo-Mediterranean diet on the omega-6/ omega-3 ratio in patients at high risk of coronary artery disease. *The Indian Paradox. World Rev. Nutr. Diet*, vol. 92, pp. 74–80.

Peterson S. W., 1958. Linseed oilmeal. dans: *Processed Plant Protein Foodstuffs*. Eds Altschul, A. M., Academic Press, New York, USA p. 539.

Pette J.W., et Lolkema H., 1951. Yoghurt IV. Factors influencing the proportion of streptococci and lactobacilli in a yoghurt culture. *Net. Milk Dairy*, vol.5, pp.14-26.

Pliny the Elder, BostockJohn, RileyHenry Thomas, 1856.The Natural History of Pliny. Bohn. London, 543p.

Popovici C., Saykova I., Tylkowski B., 2009. Evaluation de l'activité antioxydant des composés phénoliques par la réactivité avec le radical libre DPPH. *Revue de génie industriel*, vol.4, pp.25-39.

Prasad K., 1997. Hydroxyl radical-scavenging property of secoisolariciresinol diglucoside (SDG) isolated from flax-seed. *Mol. Cell.Biochem.*, vol. 168, pp. 117–123.

Prasad K., 2000. Antioxidant activity of secoisolariciresinol diglucosidederived metabolites, secoisolariciresinol, enterodiol, and enterolactone. *Int. J. Angiol.*, vol. 9, pp. 220–225.

Prasad K., 2004. Antihypertensive activity of secoisolariciresinol diglucoside (SDG) isolated from flaxseed: role of guanylatecyclase. *Int. J. Angiol.*, vol. 13, pp. 7–14.

Purwandari U., Shah N. P. and Vasiljevic T., 2007. Effects of exopolysaccharide producing strains of *Streptococcus thermophilus* on technological and rheological properties of set-type yoghurt. *International Dairy Journal*, vol.17, n.11, pp.1344-1352. DOI.org/10.1016/j.idairyj.2007.01.018.

Pyrzynska K. et Pękal A.; 2013. Application of free radical diphenylpicrylhydrazyl (DPPH) to estimate the antioxidant capacity of food samples. *Analytical Methods*, vol.5, pp.4288– 4295.

Q

Qian K. Y., Cui S. W., Goff H. D., 2012. Flaxseed gum from flaxseed hulls: Extraction, fractionation, and characterization. *Food Hydrocolloids*, vol. 28, pp. 275-283.

R

- Rabetafika H. N., Van Remoortel V., Danthine S., Paquot M., and Blecker C., 2011.** Flaxseed proteins: food uses and health benefits. *International Journal of Food Science and Technology*, vol. 46, n. 2, pp. 221-228.
- Radke-Mitchell L., Sandine W.E., 1984.** Associative Growth and Differential Enumeration of *Streptococcus thermophilus* and *Lactobacillus bulgaricus*: A Review. *Journal of Food Protection*, vol. 47, n. 3, pp. 245-248.
- Radke-Mitchell L., Sandine W.E., 1986.** Influence of temperature on Associative Growth of *Streptococcus thermophilus* and *Lactobacillus bulgaricus*. *J. Dairy Science*, vol.69, pp.2558-2568.
- Rady A., Awatif I., 1991.** Improvement of oils stability. Fourth Arab conference of Food Science and Technology, Cairo, Egypt.
- Raffaelli B., Hoikkala A., Leppala E., Wahala K., 2002.** Enterolignans. *J. Chromatogr. B*, vol.777, pp.29-43.
- Raho Ghalem Bachir et Benattouche Zouaoui, 2013.** Microbiological, physico-chemical and sensory quality aspects of yoghurt enriched with *Rosmarinus officinalis* oil. *African Journal of Biotechnology*, vol. 12, n. 2, p. 192-98. DOI.org/10.5897/AJB12.1257.
- Ramírez-Sucre M. O., and Velez-Ruiz J. F., 2013.** Physicochemical, rheological and stability characterization of a caramel flavored yogurt. *LWT e Food Science and Technology*, vol. 51, n. 1, pp. 233-241. DOI.org/10.1016/j.lwt.2012.09.014.
- Rao, M. A., Steffe, J. F., 1992.** Viscoelastic Properties of Foods. Elsevier Applied Science. Barking, U.K.
- Ratnayake W. M. N., Behrens W. A., Fischer P. W.F., L'Abbe M. R., Mongeau R., Beare-Rogers J. L., 1992.** Flaxseed: chemical stability and nutritional properties. *J. Nutr. Biochem.*, vol.3, pp. 232-240.
- Rebole A., Rodriguez M. L., Ortiz L. T., Alzueta C., Centeno C., Trevino J., 2002.** Mucilage in linseed: effects on the intestinal viscosity and nutrient digestion in broiler chicks. *J. Sci. Food Agric.*, vol. 82, pp.1171–1176.
- Ridges L, Sunderland R, Moerman K, Meyer B, Astheimer L, Howe P., 2001.** Cholesterol lowering benefits of soy and linseed enriched foods. *Asia. Pacific J. Clin.Nutr.*, vol. 10, n. 3, pp. 204–211.
- Riediger N. D., Othman R., Fitz E., Pierce G. N., Suh M., Moghadasian M. H., 2009.** Low n6:n3 fatty acid ratio, with fish or flaxseed oil, in high fat diet improves plasma lipids and beneficially alters tissue fatty acid composition in mice. *Eur. J. Nutr.*, vol. 47, pp. 153–160.

Rinaldoni Ana N., Campderrós Mercedes E., Padilla Antonio Pérez, 2012. Physico-chemical and sensory properties of yogurt from ultrafiltered soy milk concentrate added with inulin. *LWT - Food Science and Technology*, vol.45, pp.142-147.

Rohm H., 1993. Influence of dry matter fortification on flow properties of yogurt. 2. Time dependent behaviour. *Milchwissenschaft*, vol.48, pp.614–617.

Rohm H. et Kovac A., 1995. Effects of starters cultures on small deformation rheology of stirred yoghurt. *Lebensm-wwiss u.-Technology*, vol.28, pp.319-322.

Rombaut Natacha, 2013. Etude comparative de trois procédés d'extraction d'huile : aspects qualitatifs et quantitatifs : application aux graines de lin et aux pépins de raisin. Thèse de doctorat. Université de Technologie de Compiègne, 252p.

Romieu I. et Trenga C., 2001. Diet and obstructive lung diseases. *Epidemiologic Reviews*, vol.23, pp.268–287.

Ross-Murphy S. B., 1994. Rheological methods. In *Physical Techniques for the Study of Food Biopolymers*; RossMurphy, S. B., Ed.; Blackie Academic & Professional: London, U.K., pp. 343-392.

Roussel Y., Pebay M., Guedon G., Simonet J.M., Decaris B., 1994. Physical and genetic map of *Streptococcus thermophilus*. *Journal of Bacteriology*, vol.24, pp. 7413-7422.

Rubilar M., Gutiérrez C., Vedugo M., Shene C. and Sineiro J., 2010. Flaxseed as a source of functional ingredients. *Journal of soil Science, Plant Nutrition*, vol. 10, n. 3, pp. 373–377.

Rudnik E., Szczucinska A., Gwardiak H., Szulc A., Winiarska A., 2001. Comparative studies of oxidative stability of linseed oil. *Thermochim. Acta.*, vol. 370, pp. 135–40.

S

Sah B. N. P., Vasiljevic T., McKechnie S., Donkor O. N., 2016. Physicochemical, textural and rheological properties of probiotic yogurt fortified with fibre-rich pineapple peel powder during refrigerated storage. *LWT - Food Science and Technology*, vol. 65, pp. 978-86. DOI.org/10.1016/j.lwt.2015.09.027.

Sahan N., Yasar K., Hayaloglu A. A., 2008. Physical, chemical and flavor quality of non-fat yogurt as affected by a β -glucan hydrocolloidal composite during storage. *Food Hydrocolloid*, vol. 22, pp.1291–1297.

- Saini A., Harjai K., Mohan H., Punia R. P. S., Chhibber S., 2010.** Long-term flaxseed oil supplementation diet protects BALB/c mice against *Streptococcus pneumonia* infection. *Med. Microbiol. Immunol.*, vol. 199, pp. 27-34. DOI:10.1007/s00430-009-0132-7.
- Sanchez-Moreno C., Larrauri J. A, Saura-Calixto F., 1998.** A procedure to measure the antiradical efficiency of polyphenols. *Sci. Food Agr.*, vol. 76, pp. 270-276.
- Sandoval-Castilla O., Lobato-Calleros C., Aguirre-Mandujano E., Vernon-Carter E. J., 2004.** Microstructure and texture of yogurt as influenced by fat replacers. *International Dairy Journal*, vol.14, n.2, pp.151-159.
- Sanz T., Salvador A., Jimé'nez A., Fiszman S. M., 2008.** Yogurt enrichment with functional asparagus fibre. Effect of fibre extraction method on rheological properties, colour, and sensory acceptance. *Eur. Food Res. Technol.*, vol. 227, pp. 1515-1521. DOI:10.1007/s00217-008-0874-2.
- Sargi S.C., Silva B.C., Santos H.M.C., Montanher P.F., Boeing J.S., Santos Junior O.O., Souza N.E., Visentainer J.V., 2013.** Antioxidant capacity and chemical composition in seeds rich in omega-3: chia, flax, and perilla. *Food Sci. Tech.*, vol. 33, pp.541–548.
- Schkoda A., Stumph A., Kessler H. G., 1998.** Stability of texture of fermented milk products in relation to composition. *In* Texture of fermented milk products and dairy dessert. Proceedings of the IDF Symposium. Vicenza, Italy, 5-6 May, p. 115-121.
- Schkoda P., Hechler A. and Hinrichs J., 2001.** Influence of the protein content on structural characteristics of stirred fermented milks. *Milchwissenschaft*, vol.56, pp. 19-22.
- Schmidt A., Hall M. N., Koller A., 1994.** Two FK506 resistance-conferring genes in *Saccharomyces cerevisiae*, TAT1 and TAT2, encode amino acid permeases mediating tyrosine and tryptophan uptake. *Mol Cell Biol*, vol.14, n.10, pp.6597-606. DOI: 10.1128/MCB.14.10.6597.
- Schuster A., Friedt W., 1998.** Glucosinolate content and composition as parameters of quality of Camelina seed. *Ind. Crops Prod.*, vol.7, pp.297– 302.
- Selvi K.C., Pinar Y., Yesiloglu E., 2006.** Some physical properties of linseed. *Biosystems Eng.*, vol. 95, pp. 607–612.
- Seo M. H., Lee S. Y., Chang Y. H., Kwak H. S., 2009.** Physicochemical, microbial, and sensory properties of yogurt supplemented with nanopowdered chitosan during storage. *J. Dairy Sci.*, vol. 92, pp. 5907–5916.
- Serna Frédéric, Lagneau Jean et Carpentier Jean-Marc, 2014.** La diffraction des rayons X : une technique puissante pour résoudre certains problèmes industriels et technologiques. *Chimie nouvelle*, n. 116, 12p.

- Shah N. P., 2000.** Probiotic bacteria: Selective enumeration and survival in dairy products. *J. Dairy Sci.*, vol. 83, n. 4, pp. 894-907. DOI:10.3168/jds.S0022-0302(00)74953-8.
- Shah N. P., 2003.** Yogurt: The product and its manufacture. In Caballero B., Trugo L C., Finglas P. M., *Encyclopedia of Food Science and Nutrition*, 2e edition, volume 10. New York Academic Press, p. 6252-6260.
- Shahidi F., 1997.** Natural antioxidants, chemistry, health effects and applications. Champaign, IL: AOCS Press, 432p.
- Shaker R.R., Jumah R.Y., Abu-Jdayil B., 2000.** Rheological properties of plain yoghurt during coagulation process: impact of fat content and preheat treatment of milk. *Journal of Food Engineering*, vol.44, pp.175-180.
- Shakir K. A. F., Madhusudan B., 2007.** Hypocholesterolemic and hepatoprotective effects of flaxseed chutney: Evidence from animal studies. *Int. J. Clin.Biochem.*, vol. 22, n. 1, pp. 117-21. DOI:10.1007/BF02912893.
- Shim Y. Y., Gui B., Arnison P. G., Wang Y., and Reaney M. J. T., 2014.** Flaxseed (*Linum usitatissimum L.*) bioactive compounds and peptide nomenclature: A review. *Trends in Food Science & Technology*, vol. 38, n. 1, pp. 5-20.
- Shori A. B. and Baba A. S., 2011b.** *Cinnamomum verum* improved the functional properties of bioyogurts made from camel and cow milks. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, vol. 10, n. 2, pp. 101-107.
- Shori A. B. and Baba A. S., 2012.** Viability of lactic acid bacteria and sensory evaluation in *Cinnamomum verum* and *Allium sativum*-bio-yogurts made from camel and cow milk. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, vol. 11, n. 1, pp. 50-55.
- Siboukeur O., 1997.** Qualité nutritionnelle, hygiénique et organoleptique du jus de dattes. Thèse Magister, INA. El-Harrach, Alger, 106 p.
- Sidira M., Santarmaki V., Kiourtzidis M., Argyri A. A., Papadopoulou O. S., Chorianopoulos N., et al. 2017.** Evaluation of immobilized *Lactobacillus plantarum* on whey protein as adjunct probiotic culture in yoghurt production. *LWT-Food Science and Technology*, vol.75, pp.137-146.
- Siebert K. J., Troukhanova N. V. and Lynn P. Y., 1996.** Nature of polyphenol-protein interactions. *J. Agric. Food Chem.*, vol. 44, pp. 80–85.
- Sicilia T., Niemeyer H. B., Honig D. M., Metzler M., 2003.** Identification and stereochemical characterization of lignans in flaxseed and pumpkin seeds. *J. Agric. Food Chem.*, vol. 51, pp. 1181–1188.

Silva S. A., Conceicao M. M., Souza A. G., Prasad S., Silva M. C. D., Fernandes Junior V. J., Araujo A. S., Sinfronio F. S. M., 2004. Thermal analysis of the powder and the bran of algaroba. *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 75, pp. 411–7.

Simova E., 2007. Theoretical and application aspects of milk products starter cultures. Thesis. NIHFI, Plovdiv, pp. 391 (in Bulgarian).

Simopoulos A. P., 1999. Essential fatty acids in health and chronic diseases. *Am. J. Clin. Nutr.*, vol. 70, pp. 560-569.

Simopoulos A. P., 2002. The importance of the ratio of omega-6/ omega-3 essential fatty acids. *Biomedicine and Pharmacotherapy*, vol.56, pp.365– 379.

Simpolous A. P., 2004. Omega-6/omega-3 essential fatty acid ratio and chronic diseases. *Food Rev. Int.*, vol. 20, pp. 77–90.

Singh J., 1983. Influence of heat-treatment of milk and incubation temperatures on *Streptococcus thermophilus* and *Lactobacillus acidophilus*. *Milchwissenschaft*, vol.38, pp.347-348.

Singh SK., Ahmed SU., Ashok P., 2006. Yogurt science and technology. 2nd Ed. Cambridge: xoodhead publishing: pp.15-35.

Singh K. K., Jhamb S. A., Kumar R., 2011a. Effect of pretreatments on performance of screw pressing for flaxseed. *J. Food Pocess. Eng.* DOI:10.1111/j.1745-4530.2010.00606.x.

Singh K.K., Mridula D., Rehal J., Barnwal P., 2011b. Flaxseed: a potential source of food, feed and fiber. *Criti. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 51, pp. 210–222.

Singh K.K., Mridula D., Barnwal P., Rehal J., 2012. Physical and chemical properties of flaxseed . *Int. Agrophys.*, vol. 26, pp. 423-426 .DOI: 10.2478/v10247-012-0060-4.

Skriver A., RoemerH., Qvist K.B., 1993. Rheological characterization of stirred yoghurt : viscosimetry. *Journal of Texture Studies*, vol.24, pp.185-198.

Slavova kazakova A., Karamać M., Kancheva V., Amarowiczl R., 2015. Antioxidant Activity of Flaxseed Extracts in Lipid Systems. *Molecules*, vol.21, 17p.

Sodini I., Remeuf F., Haddad S. et Corrieu G., 2004. The relative effect of milk base, starter, and process on yogurt texture: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 44, pp.113–137.

Sosulski F. W., 1979. Organoleptic and nutritional effects of phenolic compounds on oilseed protein products: A review. *Oil Chemists' Soc.*, vol.56, pp.711-715.

Souza A. L., Soledade L. E. B., Santos I. M. G., Souza A. G., 2011. Influence of toasting on the nutritious and thermal properties of flaxseed. *J. Therm. Anal. Calorim .*, vol. 106, pp. 551–555. DOI 10.1007/s10973-011-1638-y.

Spiller R. C., 1994. Pharmacology of dietary fiber. *Pharmacol. Ther.*, vol. 62, pp. 407–427.

Staffolo M. D., Bertola N., Martino M., Bevilacqua A., 2004. Influence of dietary fiber addition on sensory and rheological properties of yogurt. *Int. Dairy J.*, vol. 14, pp. 263-268. DOI:10.1016/j.idairyj.2003.08.004.

Stanczyk F. Z., Sabelawskid S., Wahalae K., KurzerfM. S., Bigelowa C., 2008. Effect of dietary flaxseed on serum levels of estrogens and androgens in postmenopausal women. *Nutr. Cancer*, vol. 60, pp. 612–618.

Steffe J.F., 1996. Rheological methods in food process engineering. Freeman Press, East Lansing, MI, USA, 2nd Edition.

Steve Cui W., 1998. Flaxseed: A functional food for the 21st Century, Canadian Chemical News, pp. 19-20.

St-Gelais D. et Tirard-Collet P., 2002. Fromage; In: Vignola Carol L.: Science ET technologie du lait. Transformation du lait. Presse Internationale Polytechnique, Canada.

Stoltz Jean-François. « SANG - Écoulement », *Encyclopædia Universalis* [en ligne], consulté le 17 février 2019. URL : <http://www.universalis.fr/encyclopedie/sang-ecoulement/>

Sturgeon S. R., Heersinka J. L., Volpeb S. L., Bertone-Johnsona E. R., Puleoa E., Susheelamma N. S., 1987. Isolation and properties of linseed mucilage. *J. Food Sci. Technol.*, vol. 24, pp. 103–106.

Sun-Waterhouse D., Zhou J., Wadhwa S.S., 2013. Drinking yoghurts with berry polyphenols added before and after fermentation. *Food Control*, vol.32, pp.450-460.

Syndifrais, 1997. Mission Scientifique De Syndifrais. Yaourts, laits fermentés. *Le Lait*, vol.77, n.3, p.321-358. <hal-00929530.

T

Tamime A. Y., Kalab M., Davies G., 1984. Microstructure of set-style yoghurt manufactured from cow's milk fortified by various methods. *Food Microstructure*, vol. 3, pp. 83-92.

Tamime A. Y. et Robinson R. K., 1985. Background to manufacturing practice. *In* Yoghurt. Science and technology. Ed. Tamime, A.Y. et Robinson, R.K., Pergamon Press, Paris. p. 7-90.

Tamime A.Y., Robinson R.K., 1999. Yoghurt Science and Technology. CRC Press LLC, Woodhead publishing limited Second edition, England, 619 p.

Tamime A.Y., Robinson R.K., 2003. *Yogurt: Science and technology*, CRC Press, New York, p. 661.

Tamime Y.A., Robinson R.K., 2007. Yoghurt: Science and technology (3rd ed.). Boca Raton, FL, USA: CRC, 808p.

Tammam J.D., Williams A.G., Noble J., Lloyd D., 2000. Amino acid fermentation in non-starter *Lactobacillus* ssp. isolated from Cheddar cheese, *Letters in Applied Microbiology*, vol.30, pp.370-374.

Tarpila A., Wennberg T., Tarpila S., 2005. Flaxseed as a functional food. *Curr. Top. Nutraceutical Res.*, vol. 3, pp. 167–188.

Teles Camila Duarte, Flôres Simone Hickmann, 2007. The influence of additives on the rheological and sensory properties of nonfat yogurt. *International Journal of Dairy Technology*, vol. 60, n. 4, pp.270-276.

Teo C.T., Munro P.A., Singh H., 2000. Time dependence of rheological break down and recovery of heat precipitated whey protein suspensions. *Milchwissenschaft*, vol.55, n.1, pp.29-32.

Thakur G., Mitra A., Pal A., Rosseau D., 2009. Effect of flaxseed gum on reduction of blood glucose and cholesterol in type 2 diabetic patients. *International Journal of Food Science and Nutrition*, vol. 22, pp. 1–11.

The Dairy Council, 2013. The Nutritional Composition of Dairy Products. London, 49 p.

The Pennsylvania Code, 1992. Frozen yogurt. Common wealth of Pennsylvania [online] Available through: <<http://www.pacode.com/secure/data/007/chapter39/s39.23.html>> [Accessed 4 December 2013].

Thompson L.U., Rickard S.E., Orcheson L.J., Seidl M.M., 1996. Flaxseed and its lignin and its oil components reduce mammary tumor growth at a late stage of carcinogenesis. *Carcinogenesis*, vol. 17, pp. 1373–1376.

Thompson L. U., Chen J. M., Li T., Strasser-Weippl K., Goss P. E., 2005. Dietary flaxseed alters tumor biological markers in postmenopausal breast cancer. *Clinical Cancer Research*, vol.11, pp.3828–3835.

Tiemeier H., Van Tuijl H. R., Hofman A., Kiliaan A., Breteler M. M. B., 2003. Plasma fatty acid composition and depression are associated in the elderly: the Rotterdam Study. *Am. J. Clin. Nutr.*, vol. 78, pp. 40–46.

Tolkachev O. N., Zhuchenko A. A., 2000. Biologically active substances of flax: medicinal and nutritional properties (a review). *Pharm. Chem. J.*, vol. 34, pp. 360–367.

Tortora G.J. et Anagnostakos, N.P., 1987. Principes d'anatomie et de physiologie. Ed. INC,

5^{ème} édition, 688-693.

Toure A., Xueming X., 2010. Flaxseed lignans: source, biosynthesis, metabolism, antioxidant activity, bio-active components and health benefits. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, vol. 9, pp. 261–269.

Tudorica C. M., Jones T. E. R., Kuri V., Brennan C. S., 2004. The effects of refined barley β -glucan on the physico-structural properties of low-fat dairy products: curd yield, microstructure, texture and rheology. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 84, n. 10, pp. 1159-1169. DOI.org/10.1002/jsfa.1789.

Tuncel Necati Barış, Uygur Ayşen, Karagül Yüceer Yonca, 2017. The Effects of Infrared Roasting on HCN Content, Chemical Composition and Storage Stability of Flaxseed and Flaxseed Oil. *J. Am. Oil Chem. Soc.* DOI 10.1007/s11746-017-2982-2.

Thunell R.K., Sandine W.E., 1985. Types of starter cultures. In *Bacterial starter cultures for foods*. S.E. Gilliland (Eds.), CRC Press, Florida, pp.127-132.

Tutin T.G., Heywood V.H., Burges N.A., Moore D.M., Valentine D.H., Walters S.M. et Webb D.A. 1972. *Flora Europaea*. Vol. 3. Cambridge, Cambridge University Press, 370p.

U

USDA, 1982. Foods commonly eaten by individuals. In Amount per Day and per Eating Occasion. US. Govt. Printing Office, Washington, DC., p. 312.

USDA, 2001. USDA Specifications for Yogurt, Nonfat Yogurt and Lowfat Yogurt. Dairy Programs. Agricultural Marketing Services. United States Department of Agriculture: Washington, DC.

V

Vaisey-Genser M. A., Morris D., 2003. Introduction History of the cultivation and uses of flaxseed. dans: *Flax, The genus Linum*. Eds Muir, A. D., Wescott, N. D., CRC Press, vol. 34, pp. 1-22.

Van Marle, M. 1998. Structure and rheological properties of yoghurt gels and stirred yoghurts. Doctoral Theses. University of Twente, Enschede, Netherlands, 151p.

Van Vliet T., Van Dijk H. J. M., Zoon P., Walstra P., 1991. Relation between syneresis and rheological properties of particle gels. *Colloid and Polymer Sci.*, vol.269, pp.620-627.

Van Vliet T., Lakemond C. M. M., Visschers R. W., 2004. Rheology and structure of milk protein gels. *Current Opinion in Colloid & Interface Science.*, vol. 9, n. 5, pp. 298-304. DOI.org/10.1016/j.cocis.2004.09.002.

Van Zeiste W., 1972. Palaeo botanical results of the 1970 season at Cayonu. Turkey. *Helinium*, vol. 12, pp. 3-19.

Vignola C. I., 2002. Science et technologie du lait : transformation du lait. Lavoisier (Ed.), Paris.

Visser J., Minihan A., Smits P., Tjian S. B., Heertje I. 1986. Effects of pH and temperature on the milk salts system. *Netherlands Milk Dairy Journal*, vol. 40, pp. 351-368.

W

Walstra P., Wouters J. T. M., Geurts T. J., 2006. Dairy Science and Technology. CRC Press, Boca Raton, FL., 763p.

Wang C.Y., Singh R.P., 1978. A single drying equation for rough rice. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, vol.11, pp.668-672.

Wang C., Makela T., Hase T., Adlercreutz H., Kurzer M. S., 1994. Lignans and flavonoids inhibit aromatase enzyme in human preadipocytes. *J.Steroid Biochem. Mol. Biol.*, vol. 50, pp. 205–212.

Wang Y., Li D., Wang L. J., Li S. J., Adhikari B., 2010. Effects of drying methods on the functional properties of flaxseed gum powders. *Carbohydrate Polymers.*, vol. 81, pp. 128-33. DOI.org/10.1016/j.carbpol.2010.02.005.

Wannerberger K., Nylander T., Nyman M., 1991. Rheological and Chemical Properties of Mucilage in Different Varieties from Linseed (*Linum usitatissimum*). *Acta Agriculturae Scandinavica*, vol.41, n. 3, pp. 311- 319. DOI:10.1080/00015129109439914

Warrand J., Michaud P., Picton L., Muller G., Courtois B., Ralainirina R., et al., 2005. Structural investigations of the neutral polysaccharide of *Linum usitatissimum* L. seeds mucilage. *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 35, n. 3-4, pp. 121-25. DOI.org/10.1016/j.ijbiomac.2004.12.006.

Weerathilake W.A.D.V., Rasika D.M. D., Ruwanmali J.K.U., Munasinghe M.A.D.D., 2014. The evolution, processing, varieties and health benefits of yogurt. *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 4, Issue 4, 10 p.

Weill Pierre, Mairesse Guillaume, 2010. Le lin, son huile, sa graine... et notre santé. *Phytothérapie*, vol.8, pp.1-5. DOI 10.1007/s10298-010-0539-8

Westcott N. D., Muir A. D., 2003. Chemical studies on the constituents of *Linum* spp. In: Muir A. D., Westcott N. D. (eds.) *Flax: the genus Linum*. Taylor & Francis, London, p. 55–73.

WHO, 2003. Diet, nutrition and the prevention of chronic diseases. WHO Technical Report, Series 916, 149p.

Wiesenborn D. et al., 2002. Proceedings of the 50th Flax Institute of the United States. p. 25.

Woestyne M.V., Bruyneel B., Mergeay M., Verstraete W., 1991. The Fe²⁺ chelator proferrerosamine A is essential for the siderophore-mediated uptake of iron by *Pseudomonas roseus fluorescens*. *Applied and environmental microbiology*, vol.57, pp.949-954.

Wolff R.L., 1998. Sciadonic Acid, a Structural Analog of Arachidonic Acid. . *Journal of the American Oil Chemists' Society*, vol. 75, n. 12, pp. 1901-1902.

X

Xu Y., Hall C. III, Wolf-Hall C., 2008. Antifungal activity stability of flaxseed protein extracts using response surface methodology. *J. Food Sci.*, vol. 73, pp. 9-14.

Xu K., Guo M., Du J., Zhang Z., 2019. Okra polysaccharide: Effect on the texture and microstructure of set yoghurt as a new natural stabilizer. *International Journal of Biological Macromolecules*. DOI.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.04.035.

Y

Yakhlef H., Madani T., Ghozlane F., Bir B., 2010. Rôle du matériel animal et de l'environnement dans l'orientation des systèmes d'élevages bovins en Algérie ; in : « la filière lait en Algérie ». Communication aux 8emes Journées des Sciences Vétérinaires ,18 et 19 avril. Ecole Nationale Supérieure Veterinaire d'Alger.

Yamashita T., Sano T., Hashimoto T., Kanazawa K., 2007. Development of a method to remove cyanogen glycosides from flaxseed meal. *Int. J. Food Sci. Technol.*, vol. 42, pp.70–75.

Yapo B. M., Koffi K. L., 2008. Dietary fiber components in yellow passion fruit rinds-A potential fiber source. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 56, pp. 5880–5883.

Yaygin H., 1970. Recherches sur les températures optimales de développement de *Lb. bulgaricus* et *St. thermophilus* et influence de quelques facteurs sur leurs activités communes. *Le Lait* , vol.49, pp.439-445.

Yogurt Council, 2013.The History of Yogurt.

Yogurt & Nutrition, 2015. <https://www.yogurtinnutrition.com/fr/legendes-et-histoire-du-yaourt/>

Yogurt Page, 2012. *Types of yogurt.* [online] Available at: <<http://yogurtpage.com/types-of-yogurt>> [Accessed 4 December 2013].

Yoon S.N., Yoo B., 2017. Rheological behaviors of thickened infant formula prepared with xanthan gum-based food thickeners for dysphagic infants. *Dysphagia*, vol.32, pp.454–462.

Z

Zare F., Boye J. I., Orsat V., Champagne C., Simpson B. K., 2011. Microbial, physical and sensory properties of yogurt supplemented with lentil flour. *Food Res. Int.*, vol. 44, pp. 2482–2488.

Annexe 1 : Dosage des protéines par la méthode kjeldhal (NF-V 03-050, 1970)**☀ Mode opératoire**

- Introduire dans un matras de minéralisation 1 g de PGL, ajouter une pincé de sulfate de cuivre et de potassium comme catalyseur ;
- ajouter 15 ml d'acide sulfurique pur ;
- après une attaque à froid pendant 15 mn jusqu'à l'apparition de vapeurs blanches d'anhydride sulfurique; porter dans un minéralisateur à une température de 420 °C pendant 4 à 5 heures ;
- quand la solution devient limpide, elle est refroidie puis complétée à 100 ml avec de l'eau distillée.
- la distillation se fait dans un distillateur automatique VELP où l'ajout de 20 ml de lessive de soude à 35 % dans le matras et 25 ml d'acide borique dans une fiole de 250 ml est réalisé selon un programme établi.
- le dégagement d'ammoniac est capté par la solution d'acide borique contenant l'indicateur coloré (mélange de bleu de méthylène et rouge de méthyle).
- l'excès d'ammoniac est titré par une solution d'acide sulfurique à 0.05 N dans un titrateur automatique jusqu'à apparition du virage.

NB : un essai à blanc est réalisé dans les mêmes conditions opératoires.

☀ Expression des résultats

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

$$N\% = \frac{\frac{V}{V'} \times (N - N') \times 0.05 \times 1.4}{P} = \frac{\frac{V}{V'} \times (N - N') \times 0.07}{P}$$

avec :

V : Solution minéralisée et complétée à 100 ml ;

V' : Solution de la soude ajoutée (20 ml) ;

N : La quantité d'acide sulfurique lue après titration ;

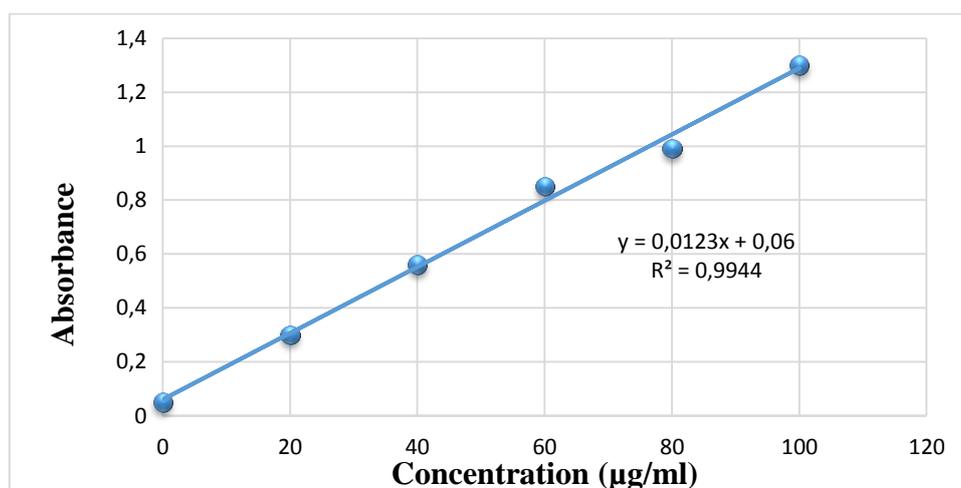
0.05 : Normalité d'acide sulfurique ;

P : Poids de la prise d'essai (1 g).

Annexe 2 : Détermination de la teneur en sucres totaux (Méthode de phénol : Dubois 1956)**☀ Mode opératoire**

L'extraction des sucres, préalable au dosage, est réalisée sur $10 \pm 0,1$ g de graines de lin broyées. Les sucres sont extraits par macération dans 100ml d'eau distillée à 85°C pendant 2h. Le mélange est ensuite centrifugé à 4000 rpm pendant 10 min à température ambiante (Oomah *et al.*, 1995a).

- préparer une gamme étalon à partir d'une solution de glucose à 1g/l.
- Introduire dans des tubes à essais 2 ml d'extrait de PGL ;
- ajouter à la gamme étalon et les tubes à essais : 0.5 ml d'une solution de phénol à 5 % et 2 ml d'acide sulfurique concentré ;
- homogénéiser au vortex ;
- placer les tubes à essai au bain marie à 90°C pendant 5min (apparition de la couleur jaune-rouge) puis stopper la réaction par un courant d'eau froide ;
- placer les tubes à l'obscurité pendant 30min ;
- le blanc est préparé en remplaçant l'échantillon par l'eau distillée ;
- La lecture de l'absorbance est faite à 490 nm.

**Figure n°30 : Courbe d'étalonnage du glucose**

Annexe 3 : Dosage des polyphénols

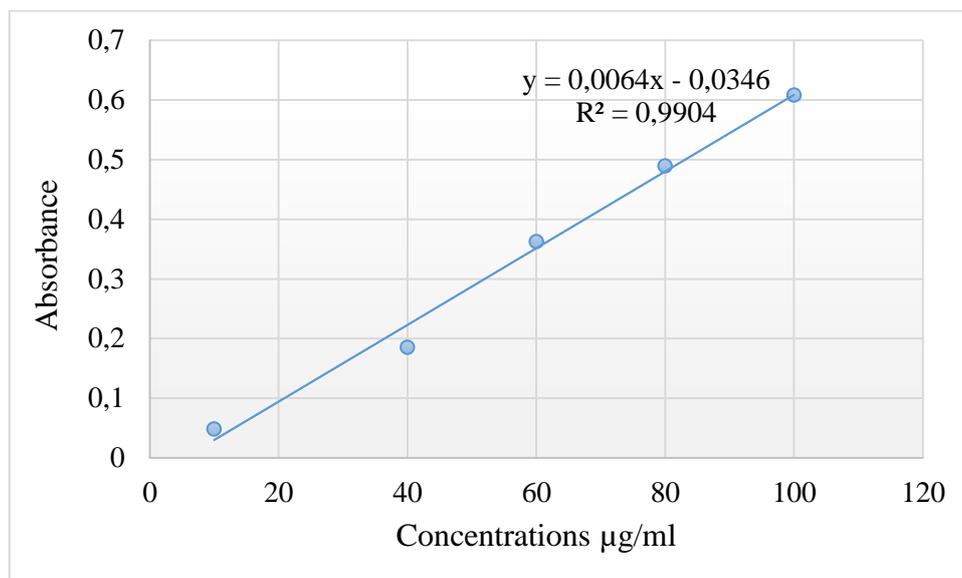
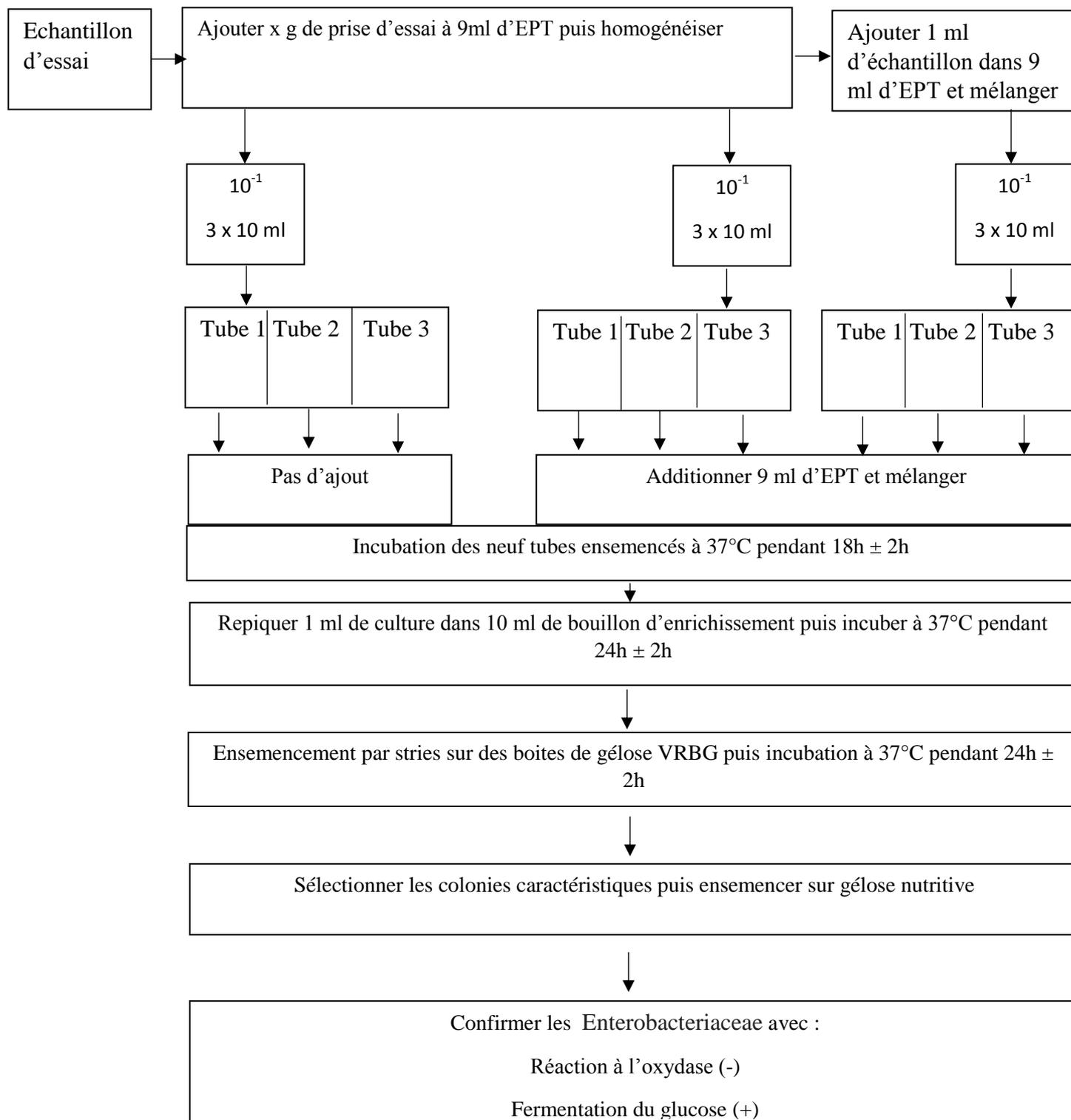


Figure n° 31: Courbe d'étalonnage de l'acide gallique

Annexe 4 : Recherche des germes pathogènes

Enterobacteriaceae NF ISO 21528-2 (2004)



**Méthode horizontale pour le dénombrement des staphylocoques à coagulase positive
(*Staphylococcus aureus* et autres espèces) NA1198**

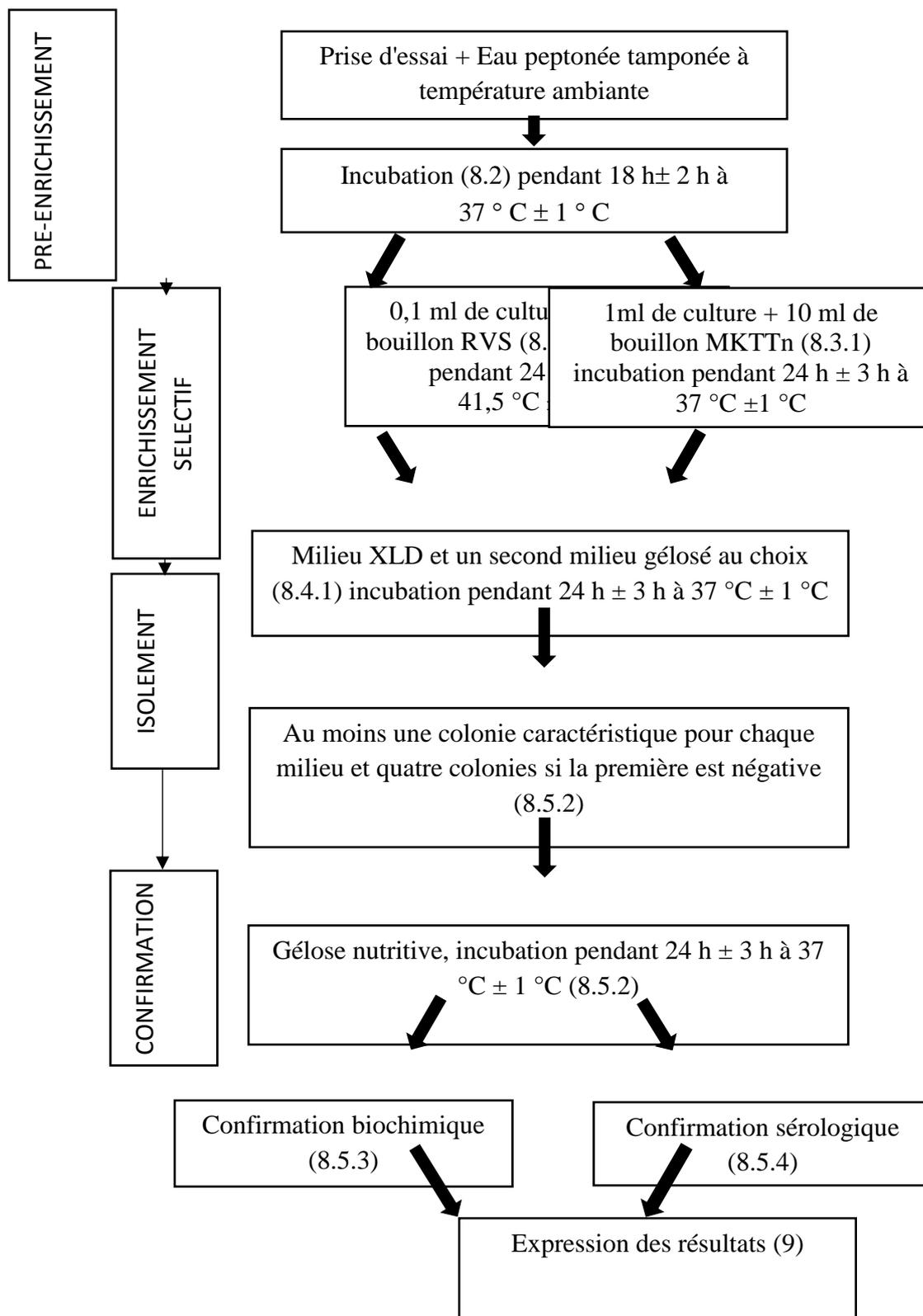
Journal Officiel De La Republique Algerienne N° 38 : 2014

La présente méthode spécifie une technique horizontale pour le dénombrement des staphylocoques à coagulase positive dans les produits destinés à la consommation humaine ou à l'alimentation animale, par comptage des colonies obtenues sur milieu solide (milieu de Baird-Parker) après incubation en aérobiose à 35° C ou 37° C.

1- Principe

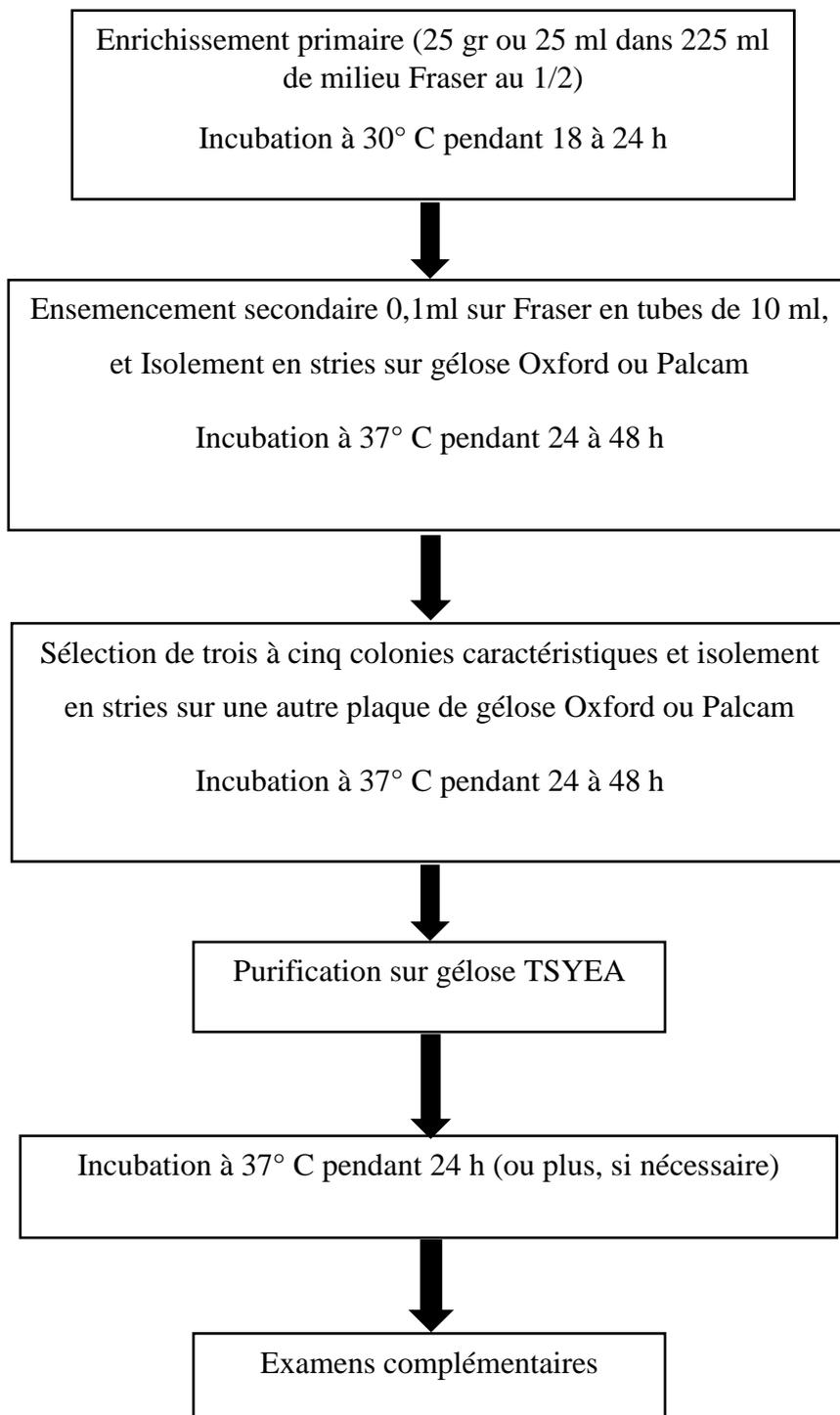
- Ensemencement en surface d'un milieu gélosé sélectif coulé dans deux séries de boites, avec une quantité déterminée de l'échantillon pour essai si le produit à examiner est liquide, ou de la suspension mère dans le cas d'autres produits. Dans les mêmes conditions, ensemencement des dilutions décimales obtenues à partir de l'échantillon pour essai ou de la suspension mère, à raison de deux boites par dilution.
- Incubation de ces boites à 35° C ou à 37° C (la température est indiquée dans le bulletin d'analyse) en aérobiose et examen après 24 h et 48 h.
- Calcul du nombre de staphylocoques à coagulase positive par millilitre ou par gramme d'échantillon, à partir du nombre de colonies caractéristiques et/ou non caractéristiques obtenues dans les boites retenues aux niveaux de dilution donnant un résultat significatif, et confirmées par un résultat positif de l'essai de la coagulase.
- le milieu gélosé est celui de Baird - Parker avec addition de sulfamézathine dans le cas ou l'on suspecte la présence de *Proteus*).

Journal Officiel De La Republique Algerienne N°44



Methode de recherche de *listeria monocytogenes*

Journal Officiel De La Republique Algerienne N° 03 : 2006



Abstract.

Flax seeds are miraculous seeds because of their high content of omega-3 fatty acids, dietary fiber, protein, polysaccharides and polyphenolic compounds essential for health, they can be used as a natural remedy for many diseases. In this study, a new dairy product was formulated by enriching natural yoghurt with flax seed powder (PGL), this formulation was made by two types of milk powder: skim milk powder and whole milk powder. The biochemical composition including the antioxidant activity and the mineral content of PGL were determined, this powder was the subject of a multitude of analyzes namely: the microstructure, the laser diffraction granulometry, the analysis by X-ray diffraction, analysis of mineral elements by X-ray fluorescence, thermogravimetric analysis and color. A biochemical, microstructural, microbiological, structural and rheological characterization was performed with the formulated yogurts. In addition, the pH value, titratable acidity and growth kinetics of lactic ferments were studied during fermentation and storage at 4 ° C. The results of the characterization of PGL prove its suitability for incorporation into a dairy product. The addition of PGL decreased pH values and increased acidity values during fermentation and refrigerated storage, particularly in the case of yoghurt made from whole milk powder. Sensory evaluation revealed that enriched whole milk yoghurt had the highest scores of texture, taste and odor compared to the control. PGL supplementation significantly increased the mean values of the number of lactic acid bacteria (CFU) but at values not exceeding 1.25×10^8 CFU / ml for *S. thermophilus* and 0.85×10^7 CFU / ml for *Lactobacillus bulgaricus* indicating the possibility of extending the shelf life of yoghurt. This supplementation made it possible to obtain yoghurts of different textures compared to the control, more rich in protein in lipids, in sugars, in minerals, in polyphenols and in dry extract. From a rheological point of view, the three yoghurts (including natural yoghurt) can be considered as rheofluidifying fluids (pseudoplastics) and the Herschel Bulkley model describes their behavior well. The results of the microbiological analyzes of yogurts clearly show a hygienic quality perfectly in line with the standards. The study concludes that the enrichment of yoghurt with PGL is appreciated by the tasters and preserves the desired physicochemical, textural, rheological and microbiological properties of the dairy product.

Keywords: flaxseed flour, yogurt, whole milk powder, skimmed milk powder, pH, titratable acidity, lactic acid bacteria, sensory properties

Résumé

Les graines de lin sont des graines miraculeuses en raison de leur richesse en acides gras oméga-3, en fibres alimentaires, en protéines, en polysaccharides et en composés polyphénoliques essentiels pour la santé, elles peuvent être utilisées comme remède naturel pour plusieurs maladies. Dans cette étude, un nouveau produit laitier a été formulé en enrichissant le yaourt nature avec la poudre de graine de lin (PGL), cette formulation a été réalisée par deux types de poudre de lait: poudre de lait écrémé et poudre de lait entier. La composition biochimique y compris l'activité antioxydante et la teneur en minéraux de la PGL ont été déterminées, cette poudre a été l'objet d'une multitude d'analyses à savoir : la microstructure, la granulométrie par diffraction laser, l'analyse par diffraction des rayons X, l'analyse des éléments minéraux par la fluorescence du rayon X, l'analyse thermogravimétrique et la couleur. Une caractérisation biochimique, microstructurale, microbiologique, structurale et rhéologique a été effectuée avec les yaourts formulés. En outre, la valeur du pH, l'acidité titrable et la cinétique de croissance des ferments lactique ont été étudiées pendant la fermentation et le stockage à 4°C. Les résultats de la caractérisation de la PGL prouvent son aptitude à l'incorporation dans un produit laitier. L'ajout de PGL a diminué les valeurs de pH et a augmenté les valeurs d'acidité pendant la fermentation et le stockage réfrigéré, en particulier dans le cas du yaourt fabriqué à partir de poudre de lait entier. L'évaluation sensorielle a révélé que le yaourt au lait entier enrichi avait les meilleurs scores de texture, de goût et d'odeur par rapport au témoin. La supplémentation de PGL a augmenté significativement les valeurs moyennes du nombre de bactéries lactiques (UFC) mais à des valeurs n'excédant pas $1,25 \times 10^8$ UFC / ml pour *S. thermophilus* et $0,85 \times 10^7$ UFC / ml pour *Lactobacillus bulgaricus* indiquant la possibilité de prolonger la durée de conservation du yaourt. Cette supplémentation a permis d'obtenir des yaourts de textures différentes par rapport au témoin, plus riches en protéines en lipides, en sucres, en minéraux, en polyphénols et en extrait sec. Du point de vue rhéologique, les trois yaourts (y compris le yaourt nature) peuvent être considérés comme des fluides rheofluidifiants (pseudoplastiques) et le modèle d'Herschel Bulkley décrit bien leur comportement. Les résultats des analyses microbiologiques des yaourts montrent clairement une qualité hygiénique parfaitement conforme aux normes. L'étude conclut que l'enrichissement du yaourt avec la PGL est apprécié par les dégustateurs et permet de conserver les propriétés physicochimiques, texturales, rhéologiques et microbiologiques souhaitables du produit laitier.

Mots clés: Poudre de graine de lin, yaourt, poudre de lait entier, poudre de lait écrémé, pH, acidité titrable, bactéries lactiques, propriétés sensorielles

ملخص

بذور الكتان هي بذور معجزة بسبب محتواها العالي من أحماض أوميغا 3 الدهنية والألياف الغذائية والبروتين والسكربيات ومركبات البوليفينوليك الضرورية للصحة، ويمكن استخدامها كعلاج طبيعي للعديد من الأمراض. في هذه الدراسة، تمت صياغة منتج ألبان جديد عن طريق إثراء الزبادي الطبيعي بمسحوق بذور الكتان (PGL)، وقد تم تصنيع هذه التركيبة بواسطة نوعين من مسحوق الحليب: مسحوق الحليب الخالي من الدسم ومسحوق الحليب كامل الدسم. تم تحديد التركيب الكيميائي الحيوي بما في ذلك نشاط مضادات الأكسدة والمحتوى المعدني لمسحوق بذور الكتان، وكان هذا المسحوق موضوعاً للعديد من التحليلات وهي: البنية المجهرية، قياس الحبيبات بالليزر، التحليل بواسطة حيود الأشعة السينية، تحليل العناصر المعدنية بواسطة مضاد الأشعة السينية، التحليل الحراري والجاذبي. تم إجراء توصيف بيوكيميائي، مجهرية، ميكروبيولوجي، هيكلية وريولوجي للزبادي المصاغ. بالإضافة إلى ذلك، تمت دراسة قيمة pH وحموضة المعايرة وحرارية النمو للخمائر اللبنية أثناء التخمر والتخزين عند 4 درجات مئوية. تثبت نتائج توصيف PGL مدى ملاءمتها للاندماج في منتج الألبان. أدت إضافة PGL إلى انخفاض قيم pH وزيادة قيم الحموضة أثناء التخمر والتخزين المبرد، خاصة في حالة الزبادي المصنوع من مسحوق الحليب كامل الدسم. كشف التقييم الحسي أن اللبن كامل الدسم المخصب يحتوي على أعلى الدرجات من المذاق والنزق والرائحة مقارنة بالعينة الشاهد. إضافة PGL زادت بشكل كبير من القيم المتوسطة لعدد بكتيريا حمض اللبنيك (CFU) ولكن بقيم لا تزيد عن 1.25×10^8 CFU / ml لـ *S. thermophilus* و 0.8×10^7 CFU / ml لـ *Lactobacillus bulgaricus* مما يشير إلى إمكانية إطالة العمر الافتراضي للبن الزبادي. مكنت هذه المكملات من الحصول على زبادي من قوام مختلف مقارنة بالعينة الشاهد، وهو غني بالبروتين في الدهون والسكربيات والمعادن والفلافينول والمستخلص الجاف. من وجهة نظر ريولوجية، يمكن اعتبار الزبادي الثلاثة (بما في ذلك الزبادي الطبيعي) بمثابة سوائل مميعة (شبه البلاستيك) ويصف نموذج هيرشل براكلي سلوكهم جيداً. تُظهر نتائج التحليل الميكروبيولوجي للبنين بوضوح جودة صحية تتفق تماماً مع المعايير. وخلصت الدراسة إلى أن إثراء الزبادي بـ PG موضع تقدير من قبل المتذوقين ويحافظ على الخصائص الفيزيائية والكيميائية والنسجية والريولوجية والميكروبيولوجية المطلوبة لمنتج الألبان.

كلمات مفتاحية: مسحوق بذور الكتان، الياغورت، مسحوق الحليب كامل الدسم، مسحوق الحليب منزوع الدسم، الرقم الهيدروجيني، الحموضة المعاوضة، بكتيريا حمض اللاكتيك، خصائص حسية.