

Table des matières

Résumé.....	iii
Liste des tableaux	vii
Liste des figures.....	viii
Liste des abréviations.....	x
Remerciements	xi
Avant-Propos	xii
Introduction	1
Chapitre 1: Littérature.....	3
1.1. Le lait de transformation et ses composantes majeures	3
1.2. Procédé de fabrication de yogourt	4
1.2.1. Yogourt ferme et yogourt brassé	4
1.2.2. Standardisation du mélange laitier.....	5
1.2.3. Homogénéisation.....	7
1.2.4. Traitement thermique.....	8
1.2.5. Fermentation	9
1.2.6. Brassage	11
1.2.7. Refroidissement.....	14
1.2.8. Entreposage	16
1.3. Problématique	17
1.4. But, hypothèse et objectifs.....	17
1.4.1. But	17
1.4.2. Hypothèse.....	18
1.4.3. Objectif général.....	18
1.4.4. Objectif 1.....	18
1.4.5. Objectif 2.....	18
Chapitre 2 : Impact de la vitesse de refroidissement et du temps d'entreposage sur les propriétés rhéologiques et la synérèse d'un yogourt brassé sans matière grasse.	19
2. Résumé	20
2.1. Introduction.....	21
2.2. Matériels et méthodes	23
2.2.1. Ingrédients laitiers	23
2.2.2. Microorganismes	24
2.2.3. Préparation du ferment	24
2.2.4. Préparation du mélange laitier	24
2.2.5. Production de yogourt.....	25

2.2.6.	Banc d'essai	26
2.2.7.	Brassage et refroidissement du yogourt.....	27
2.2.8.	Analyses.....	30
2.2.8.1.	pH et acidité titrable	30
2.2.8.2.	Viscosité apparente	30
2.2.8.3.	Fermeté.....	31
2.2.8.4.	Synérèse	31
2.2.8.5.	Compte bactérien	32
2.2.8.6.	Analyse statistique.....	32
2.3.	Résultats de l'effet du procédé envers les propriétés rhéologiques et physicochimiques des yogourts	34
2.4	Résultats de l'effet de l'entreposage	34
2.4.1	pH, acidité titrable et dénombrement bactérien.....	34
2.4.2.	Propriétés rhéologiques et physicochimiques	36
2.4.2.1.	Synérèse	36
2.4.2.2.	Fermeté	36
2.4.2.3.	Viscosité apparente	37
2.5.	Discussion	37
2.6.	Conclusion.....	42
	Chapitre 3: Effet de la matière grasse, de la tortuosité des conduites et de la vitesse de refroidissement sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques des yogourts brassés.	43
3.	Résumé	44
3.1.	Introduction.....	45
3.2.	Matériels et méthodes	48
3.2.1.	Microorganismes	48
3.2.2.	Ingrédients laitiers	48
3.2.3.	Préparation du ferment	49
3.2.4.	Préparation du mélange laitier	49
3.2.5.	Configurations du banc d'essai pilote	50
3.2.6.	Équipements pour le refroidissement.....	53
3.2.7.	Production de yogourt.....	54
3.2.8.	Analyses.....	55
3.2.8.1.	Composition des ingrédients et des yogourts brassés	55
3.2.8.2.	pH et acidité titrable	56
3.2.8.3.	Viscosité apparente	56
3.2.8.3.1.	Rhéomètre.....	56

3.2.8.3.2. Entonnoir Posthumus	57
3.2.8.4. Fermeté	57
3.2.8.5. Synérèse	58
3.2.8.6. Compte bactérien	58
3.2.8.7. Analyse statistique.....	59
3.3. Résultats	60
3.4.1. Composition des yogourts	60
3.4.2. Dénombrement bactérien	60
3.4.3. Propriétés rhéologiques et physicochimiques	60
3.4.3.1. Synérèse	60
3.4.3.2. Fermeté et viscosité.....	61
3.4. Discussion	65
3.6. Conclusion.....	71
Conclusion générale.....	72
Bibliographie	74
Annexe.....	80

Liste des tableaux

Tableau 2.1: Composition du lait écrémé et des différents ingrédients laitiers	24
Tableau 2.2: Quantité de lait écrémé et de chaque ingrédient laitier mélangés pour obtenir 10 kg de mélange laitier.	25
Tableau 2.3 : Valeurs des propriétés rhéologiques et physicochimiques des yogourts pendant leur refroidissement à 35°C, 20°C et à la fin du refroidissement à 5°C.....	34
Tableau 2.4 : Impact de la vitesse de refroidissement de 5, 24 et 72 h sur les valeurs de pH des yogourts lors de l'entreposage.....	35
Tableau 2.5 : Teneur en acide lactique des yogourts après 0 et 21 jours d'entreposage.....	35
Tableau 2.6: Impact de la vitesse de refroidissement sur les valeurs de fermeté des yogourts lors de l'entreposage.....	36
Tableau 2.7: Valeur de fermeté des yogourts après 0 et 21 jours d'entreposage.....	37
Tableau 2.8: Valeur de viscosité apparente avec un cisaillement de 10,5 s-1 des yogourts après 0 et 21 jours d'entreposage.....	37
Tableau 3.1 : Liste d'ingrédients composant le mélange laitier.	49
Tableau 3.2 : Quantité (kg) d'ingrédients utilisée pour la formulation du mélange laitier.....	50
Tableau A1: Programmation d'une vitesse de refroidissement de 5 heures.	80
Tableau A2: Programmation d'une vitesse de refroidissement de 24 heures.	80
Tableau A3: Programmation d'une vitesse de refroidissement de 72 heures.	81

Liste des figures

Figure 1.1 : Schéma du procédé générique de la fabrication des yogourts fermes et brassés.....	5
Figure 2.1 : Banc d'essai utilisé pour la production de yogourt brassé.....	26
Figure 2.2: Pots de yogourts avec et sans thermocouple à l'intérieur de la chambre environnementale.....	27
Figure 2.3: Refroidissement des yogourts (175 mL) avec une vitesse de refroidissement de : 5 (a), 24 (b) et 72 (c) heures.....	29
Figure 3.1: Schéma du banc d'essai pilot (BEP) avec une configuration linéaire (a) ou tortueuse (b).....	51
Figure 3.2: Section commune des configurations du BEP: (1) Cuve, (2) Pompe, (3) Thermocouple (T1), (4) buse de 1.4mm, (5) Échangeur de chaleur tubulaire, (6) mélangeur à pales hélicoïdales.....	52
Figure 3.3: Section du BEP comportant la configuration A: (1) Échangeur de chaleur tubulaire, (2) Thermocouple T2, (3) Buse de lissage de 425 µm, (4) Thermocouple T3, (5) Valve d'échantillonnage.....	52
Figure 3.4: Section du BEP comportant la configuration B: (1) Échangeur de chaleur tubulaire, (2) Thermocouple T2, (3) Buse de lissage de 425 µm, (4) Coude en angle de 90°, (5) Thermocouple T3, (6) Valve d'échantillonnage.....	52
Figure 3.5: Refroidissement des pots de yogourt (175 mL) avec une vitesse de refroidissement rapide (YR) dans une chambre froide et lente (YL) dans une chambre environnementale.....	54
Figure 3.6 : Indice de synérèse des yogourts à 0% (YSG) et à 2,6% (YFG) de matière grasse, durant leur entreposage.....	61
Figure 3.7 : Fermeté des yogourts à 0% (YSG) et à 2,6% (YFG) de matière grasse, durant leur entreposage.....	62
Figure 3.8 : Viscosité au rhéomètre des yogourts à 0% (YSG) et à 2,6% (YFG) de matière grasse, durant leur entreposage.....	63
Figure 3.9 : Valeur du temps d'écoulement à l'entonnoir Posthumus des yogourts à 0% (YSG) et à 2,6% (YFG) de matière grasse, durant leur entreposage, ayant subi une vitesse de refroidissement rapide (YR) et une vitesse de refroidissement lente (YL).....	63
Figure 3.10 : Valeur du temps d'écoulement à l'entonnoir Posthumus des yogourts à 0% (YSG) et à 2,6% (YFG) de matière grasse après 1 et 21 jours d'entreposage.....	64
Figure 3.11 : Valeur de fermeté des yogourts après 1 et 21 jours d'entreposage.....	64

Figure 3.12 : Valeur de la viscosité au rhéomètre des yogourts après 1 et 21 jours d'entreposage..... 65

Liste des abréviations

MG : Matière grasse laitière

PLÉ : Poudre de lait écrémé

PS : Protéine sérique

CPL : Concentré de protéines sériques

ST : *Streptococcus thermophilus*

LB : *Lactobacillus delbrueckii bulgaricus*

CS : Caséines

ST : Solides totaux

LÉ : Lait écrémé

UFC : Unité formatrice de colonie

AOAC : Association of official analytical chemists

FIL: Fédération internationale du lait

Y5: Yogourt ayant subi un refroidissement de 20 à 5°C en cinq heures

Y24: Yogourt ayant subi un refroidissement de 20 à 5°C en 24 heures

Y72: Yogourt ayant subi un refroidissement de 20 à 5°C en 72 heures

SNG : Solides non gras

LEC : Lait entier cru

YSG : Yogourt sans gras

YFG : Yogourt à faible teneur en matière grasse

YR : Yogourt ayant subi une vitesse de refroidissement rapide de 20 à 5°C

YL : Yogourt ayant subi une vitesse de refroidissement lente de 20 à 5°C

BEP : banc d'essai pilote

T1 : Thermocouple avant l'échangeur de chaleur tubulaire

T2 : Thermocouple après l'échangeur de chaleur tubulaire

T3 : Thermocouple à l'empotage des yogourts

Remerciements

Premièrement, je tiens à remercier ma directrice Dr. Sylvie Turgeon pour m'avoir accepté sous son aile et me permettre ainsi de faire une maîtrise. Ensuite, j'aimerais dire comment je suis reconnaissant envers Dr. Daniel St-Gelais et Sébastien Villeneuve pour leur aide qu'ils m'ont donnée sur la résolution de problème et sur la rédaction de mon mémoire.

Je tiens également à remercier le MAPAQ, FRQNT, AAC et Novalait pour le support financier de ce projet et aussi à nos partenaires industriels pour les dons (Biena et Agropur) et l'approvisionnement (Chalifoux et Quadra Chemicals) en matières premières. Sans eux, ce projet n'aurait jamais abouti.

De plus, mille mercis à Gaétan Bélanger, Sophie Turcot, Annie Caron, Louis-Philippe Des Marchais, Stefan Grabowski et Reza Mohammed Zareifard pour leurs aides techniques et leurs idées qui m'ont guidé dans la bonne direction. La réalisation de ce projet s'est faite conjointement avec deux étudiantes en maîtrise sur le yogourt brassé; Noémie Lussier et Valérie Guénard Lampron. Celles-ci m'ont bien conseillé sur la précarité de certains équipements et sur certaines analyses, ce qui m'a permis de sauver plusieurs mois de travail (et de stress). Sans elles, je doute que j'aie atteint le même niveau de sagesse, car elles m'ont appris à me questionner sur mes décisions. Ainsi pendant ces deux années au centre de recherche de Saint-Hyacinthe, je peux dire que j'ai travaillé sur les épaules d'un géant.

Ce mémoire est dédié à mon filleul Thomas Holderberg, auquel j'espère de tout cœur qu'il suivra les pas de son parrain afin de rencontrer des gens aussi merveilleux que j'ai connus.

Avant-Propos

Ce mémoire est présenté sous forme d'articles scientifiques avec trois chapitres et une conclusion générale. Pour ces derniers, j'en suis l'auteur principal. La planification du projet, la production de yogourt, la réalisation des analyses, la compilation des résultats et la rédaction du mémoire ont été faites au Centre de Recherche de Saint-Hyacinthe d'Agriculture et Agroalimentaire Canada. Le projet a été effectué sous la supervision de Dr. Sylvie Turgeon, directrice, de Dr. Daniel St-Gelais, co-directeur et de Dr. Sébastien Villeneuve. Tous les trois m'ont aidé à l'élaboration du projet de recherche grâce à leurs conseils et leurs expertises.

Le premier chapitre, intitulé « *Revue de littérature* » détaille la différence entre le yogourt ferme et le yogourt brassé, explique le procédé de fabrication de yogourt et mentionne les causes probables qui occasionnent des défauts de texture. Une section plus approfondie sur l'étape du refroidissement et sur le brassage a été produite afin de mettre en contexte l'hypothèse de recherche, le but, l'objectif général et les objectifs spécifiques du projet qui sont présentés à la fin de ce chapitre.

Le deuxième chapitre : « *Impact de la vitesse de refroidissement et du temps d'entreposage sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques d'un yogourt brassé sans gras* » présente l'impact de la vitesse de refroidissement sur la fermeté, la viscosité, l'acidité et la synérèse du yogourt, brassé à l'aide d'un banc d'essai pilote.

Le troisième chapitre : « *Effet de la matière grasse, de la tortuosité des conduites et de la vitesse de refroidissement sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques des yogourts brassés* » porte sur l'impact de la teneur en matière grasse sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques d'un yogourt pompé à travers différentes tortuosités et refroidit à différentes vitesses. Ce chapitre a permis de connaître si la tortuosité et l'ajout de matière grasse ont influencé l'effet des vitesses de refroidissement.

Ce mémoire se termine par une « *Conclusion générale* » qui présente les résultats les plus significatifs, les nouvelles connaissances acquises et ce qui resterait à faire.

Introduction

De 2007 à 2016, la production canadienne de yogourt a augmenté de 60% pour atteindre un volume de plus de quatre millions de kg (A.A.C., 2016c). Cette augmentation de production s'explique entre autres par un grand intérêt de la part des consommateurs canadiens pour ce type de produit tel que démontré par la littérature scientifique, peut être considéré comme un aliment fonctionnel (A.A.C., 2009).

Au Canada, il n'y a pas de définition ni de loi sur le yogourt, alors qu'au Québec un yogourt est défini comme un produit obtenu par la fermentation du lait, du lait partiellement écrémé ou du lait écrémé par les bactéries *Lactobacillus delbrueckii* spp *bulgaricus* et *Streptococcus thermophilus*. La loi permet l'ajout d'ingrédients provenant du lait, d'additifs alimentaires autorisés comme des agents épaississants (amidons, gommes et pectines) et d'autres ingrédients. Finalement le yogourt doit contenir au minimum 0,7% d'acide lactique, 9,5% de solides non gras du lait, 3% de protéines laitières et 10^7 unités formant des colonies (*Lactobacillus delbrueckii* spp *bulgaricus* et *Streptococcus thermophilus*) par millilitre (UFC/mL) (MAPAQ, 2016).

La production de yogourt brassé implique un conditionnement (brassage et pompage à 40°C, refroidissement, lissage et empotage à 20°C), un refroidissement et un entreposage à 5°C. Une configuration non adéquate du conditionnement peut causer une déstructuration plus prononcée de la matrice protéique du gel, ce qui peut occasionner la formation de défauts de texture comme la perte de viscosité et l'apparition de synérèse (séparation du lactosérum) qui sont les plus courantes (Lee & Lucey, 2010; Mizrahi, 2010; O'Rell & Chandan, 2013; Chandan & O'Rell, 2013b; Sodini *et al.*, 2004; Tamime & Robinson, 1999b). La tortuosité des conduites (tuyau en forme de coude en angle de 90°) peut occasionner une diminution de la pression du pompage du yogourt, appelée perte de charge, qui peut entraîner une diminution de la viscosité (Schmitt *et al.*, 1998; Fangary *et al.*, 1999; Tamime & Robinson, 2007b). Lucey (2004a) et O'Rell et Chandan (2013) ont mentionné qu'un refroidissement de 20 à 5°C effectué de manière trop rapide peut engendrer une contraction de la matrice protéique du yogourt et ainsi favoriser la synérèse. Un lissage à basse température ($\leq 4^\circ\text{C}$) peut occasionner un cisaillement élevé qui se traduit par une perte de viscosité et de fermeté (Tamime & Robinson, 2007b; Van Marle, 1998). Quant au refroidissement, Martens (1972) a observé qu'un yogourt brassé ayant subi un refroidissement lent démontrait

une fermeté et une viscosité plus élevées que celui refroidi rapidement. Cependant l'auteur n'a pu confirmer si cette augmentation était due au développement de l'acidité ou au temps de refroidissement plus long.

Pour pallier ces défauts, les compagnies peuvent augmenter la teneur en solides totaux à 14 ou 15% avec l'ajout d'ingrédients laitiers en poudre. Par contre, leur incorporation excessive peut occasionner une texture granuleuse. Néanmoins, il est toutefois possible d'éviter ce défaut par l'ajout de matière grasse dans la matrice (Sandoval-Castilla *et al.*, 2004). Plusieurs études ont été menées pour comprendre l'impact de l'augmentation de la teneur en solides totaux, de la modification des paramètres du conditionnement et de l'entreposage sur le développement de l'acidité, la viscosité, la synérèse et la fermeté d'un yogourt produit en laboratoire. Cependant, ces études se sont majoritairement focalisées sur le yogourt ferme ou brassé à la main en plus d'utiliser des méthodes de refroidissement impliquant l'utilisation d'un réfrigérateur ou d'un bain d'eau glacée. Ces méthodes de brassage et de refroidissement ne représentent pas la réalité industrielle. Peu d'études ont utilisé des systèmes plus proches des procédés industriels.

Par conséquent, le but de cette étude était de déterminer l'impact de la teneur en matière grasse, de la vitesse de refroidissement et de la tortuosité des conduites sur le développement de l'acidité et sur l'évolution de la viscosité, de la fermeté et de la synérèse d'un yogourt, brassé à l'aide d'un banc d'essai pilote dont les caractéristiques reflètent d'avantage la réalité d'un brassage industriel.

Chapitre 1: Littérature

Les yogourts au Canada sont consommés, par ordre d'importance, sous quatre formes; brassé, ferme, à boire et glacé. Depuis 2007, la consommation de yogourt au Canada a augmenté de 47% pour atteindre un volume de 10,31 litres par habitant (A.A.C., 2016b).

1.1. Le lait de transformation et ses composantes majeures

Le lait est l'ingrédient principal utilisé pour la production de yogourt. Il est constitué de composés solubles (protéines solubles, lactose et minéraux), de matière grasse émulsifiée sous forme de globules de gras et de micelles de caséines en suspension colloïdale (Amiot *et al.*, 2002). Au Canada, le lait est constitué en moyenne de 4,04% de matière grasse, 3,33% de protéines et 9,04% de solides non gras (A.A.C., 2016a).

La matière grasse (MG) se présente sous forme de globules de gras sphériques ayant un diamètre moyen de 4 à 5 µm (Bazinet *et al.*, 2002). Ces globules sont enveloppés d'une membrane composée de plusieurs couches de lipoprotéines et de phospholipides qui contiennent une partie hydrophile et hydrophobe (Amiot *et al.*, 2002).

Le principal sucre dans le lait, le lactose, est un disaccharide constitué d'un glucose et d'un galactose, qui joue un rôle majeur durant la production du yogourt. Il est la source de carbone pour la croissance bactérienne durant la fermentation du yogourt (Brisson & Singh, 2013).

Les protéines laitières sont les caséines et les protéines sériques qui représentent respectivement 80 et 20% de la teneur en protéines (3,5%) (Amiot *et al.*, 2002). Les caséines, sous forme de micelles, ont été étudiées extensivement et comportent quatre structures distinctes; (α_{s1} , α_{s2} , β et κ) qui sont reliées entre elles par des ponts de phosphate de calcium (Creamer & Macgibbon, 1996; Holt, 2016; Brisson & Singh, 2013). La caséine- κ contient une partie C-terminale hydrophile (caséinomacropeptide) qui est principalement localisée à la surface de la micelle. Cette partie, chargée négativement, provoque une répulsion stérique entre les micelles permettant ainsi une stabilité de la phase colloïdale dans le lait (Dagleish & Corredig, 2012). Due à leur sensibilité au calcium, les caséines- α_{s1} , α_{s2} et β sont positionnées à

l'intérieur de la micelle, alors que la caséine-κ se retrouve à la surface afin de stabiliser la micelle de caséines (Horne, 2008). L'intégrité de cette dernière qui est affectée lors de l'acidification du lait, sera détaillée dans la section 1.6. Les protéines sériques, composant la phase soluble du lait, regroupent les espèces suivantes; β-lactoglobuline, α-lactalbumine, albumine de sérum bovin, immunoglobulines et la lactoferrine (Singh & Bennett, 2002). Celles-ci présentent une structure globulaire susceptibles à la dénaturation thermique (Brisson & Singh, 2013). Cette propriété sera détaillée dans la section 1.5.

1.2. Procédé de fabrication de yogourt

1.2.1. Yogourt ferme et yogourt brassé

Le procédé de fabrication du yogourt ferme et brassé est présenté à la figure 1.1. Les étapes de standardisation, d'homogénéisation, de traitement thermique et d'inoculation du mélange laitier pour le yogourt peuvent être identiques jusqu'à l'étape de l'inoculation. Selon le type de yogourt, l'incubation se réalise en pot (yogourt ferme) ou en cuve (yogourt brassé). Cette étape se déroule à une température (40-45°C) qui favorise la croissance des deux bactéries lactiques thermophiles (*Lactobacillus delbrueckii* spp *bulgaricus* et *Streptococcus thermophilus*). Pendant la fermentation, le lactose est utilisé par les bactéries lactiques pour produire de l'acide lactique ce qui acidifie le lait et provoque progressivement sa gélification (Lucey & Singh, 1997). Après la fermentation, les contenants de yogourt ferme sont immédiatement refroidis et entreposés au froid pour ralentir l'acidification du yogourt par les bactéries lactiques. Pour le yogourt brassé, l'étape de fermentation est suivie d'un conditionnement qui implique un brassage, un pompage, un refroidissement autour de 20°C, un lissage, un empotage et un entreposage entre 2 et 5°C (Lee & Lucey, 2010).

La microstructure du yogourt ferme est composée d'enchevêtements de micelles de caséines et de protéines sériques dénaturées formant un réseau tridimensionnel (van Vliet *et al.*, 1991). Van Marle (1998) définit le yogourt brassé comme une dispersion d'agrégats de 30 µm composés d'amas de protéines (regroupement de protéines sériques et de caséines). Cayot *et al.* (2003) et Lee et Lucey (2006) ont démontré que les propriétés rhéologiques et physicochimiques du yogourt brassé sont dépendantes de celles du gel avant le brassage. Cependant, due à

la complexité de simuler un brassage de type industriel à l'échelle laboratoire, la majorité des études se sont focalisées sur le yogourt ferme.

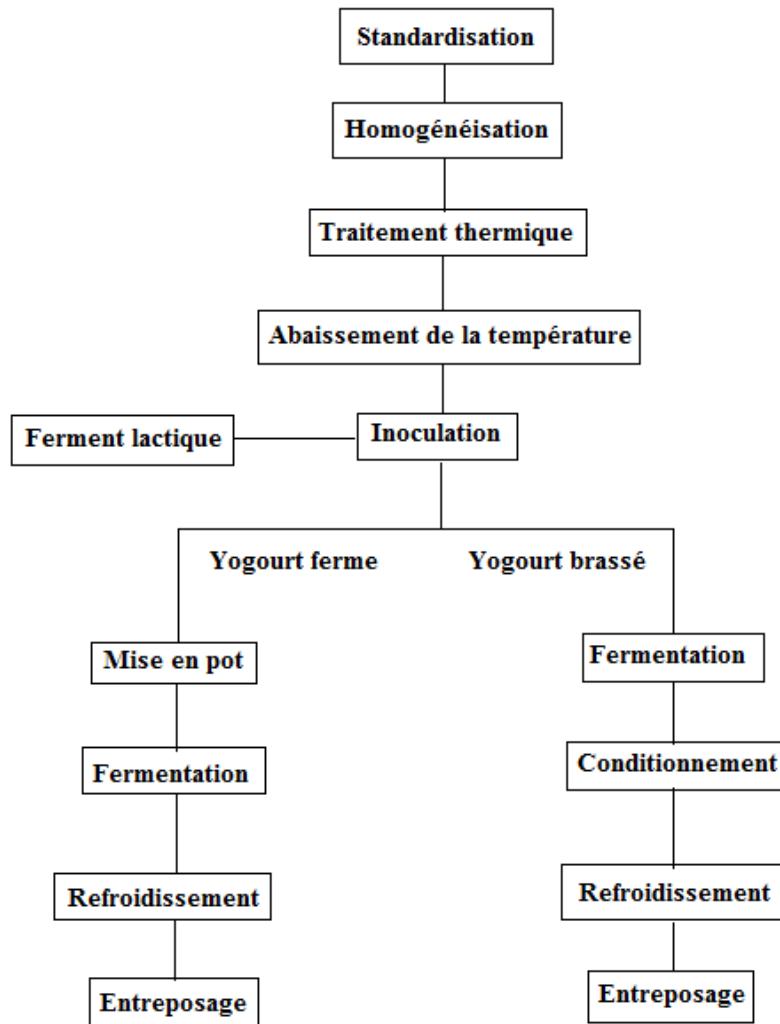


Figure 1.1 : Schéma du procédé générique de la fabrication des yogourts fermes et brassés.

1.2.2. Standardisation du mélange laitier

Pour la production du yogourt brassé, le mélange laitier est principalement composé de lait frais. Cependant, et afin, que le yogourt rencontre les critères d'acceptabilité du MAPAQ et de qualité (absence de défauts de texture), celui-ci doit généralement être enrichi en solides totaux (entre 14 et 15%), en matière grasse (0,5 et 3,5 %), en solides non gras et en protéines (Tamime & Robinson, 1999a). La méthode conventionnelle de fortification du lait implique l'addition d'ingrédients laitiers en poudre ou sous forme de concentré liquide. Les sources de solides totaux pour le mélange

laitier sont; le lactose en poudre, le concentré protéique de lactosérum (CPL) et la poudre de lait entier, partiellement écrémé ou écrémé (Sodini & Tong, 2013). Toutefois, le CPL et la poudre de lait (écrémé) permettent aussi d'ajuster respectivement la teneur en protéines sériques et totales. L'addition de lactose en poudre est souvent employée pour contrôler la teneur en solides non gras (Chandan & O'Rell, 2013b; Brisson & Singh, 2013). Penna *et al.* (2006) et Harwalkar et Kalab (1986) ont démontré que l'augmentation de la teneur en solides totaux augmente la viscosité et la fermeté des yogourts, mais diminue la synérèse, soit l'expulsion du lactosérum à l'extérieur du gel.

La standardisation de la MG dans le mélange laitier se fait généralement par l'addition de crème, mais peut aussi impliquer l'incorporation de lait entier et partiellement écrémé ou sous forme de poudre (Tamime & Robinson, 1999a). La MG non homogénéisée influence peu ou pas les propriétés du yogourt, car celle-ci est alors emprisonnée dans le réseau protéique sans participer à sa formation (van Vliet, 1982). Cependant, l'homogénéisation de la matière grasse, réorganise la membrane des gouttelettes de MG permettant l'adhésion des caséines et modifiant ainsi leur rôle dans le réseau gélifié de yogourt. Cette propriété sera détaillée dans la section 1.2.3. Ainsi, l'ajout de lipides homogénéisés dans le yogourt traité thermiquement résulte en une viscosité et une fermeté plus élevée tout en abaissant la synérèse (Shaker *et al.*, 2000; Michalski *et al.*, 2002; Kamarides *et al.*, 2007; Torres *et al.*, 2011; Brisson & Singh, 2013; De Lorenzi *et al.*, 1995). En effet, Martens (1972) et Becker et Puhan (1989) ont démontré qu'avec une homogénéisation et un traitement thermique identique, le yogourt brassé à 3,7% de MG provoquait une augmentation de la viscosité de 75% et de la fermeté de 23% comparativement à un yogourt sans MG. Toutefois, ces expérimentations ont été réalisées sur un yogourt brassé à la main et peu d'études ont rapporté l'effet de la MG avec un brassage plus complexe de type industriel.

La teneur en protéines totales (caséines et protéines sériques) peut être contrôlée par l'incorporation de poudre de lait écrémé (PLÉ) ou entier, de poudre de babeurre ou de lait condensé, mais la PLÉ est majoritairement employée (Chandan & O'Rell, 2013a; Robinson *et al.*, 2007). Sodini et Tong (2013) rapportent que l'utilisation de PLÉ à basse température (72°C, 15 s) est préférable, à l'utilisation de PLÉ à température moyenne (85°C, 5 min) et à haute température (90-95°C, 5 min) qui sont plus difficile à solubiliser due à la dénaturation partielle ou totale des protéines sériques. Quant aux protéines sériques, leur teneur peut être standardisée avec un isolat de

protéines sériques ($\geq 90\%$) ou par des CPL qui renferment entre 34 et 80% de protéines sériques. Chandan et O'Rell (2013a) rapportent que l'industrie préfère utiliser le CPL à 34% dû à son faible coût. Pour éviter l'apparition de défauts, l'ajout de protéines totales dans le yogourt est important puisque leur incorporation va renforcer le réseau tridimensionnel du gel protéique durant la fermentation. Tamime et Robinson (2007a) rapportent que les yogourts vendus commercialement contiennent entre 4,5-5% de protéines totales et 1 à 2% de protéines sériques (PS). Une teneur en PS plus élevée peut occasionner des défauts de texture et de goût. Un ratio de protéines sériques par caséines (PS/CS) de 0,22 est suggéré pour éviter la présence d'une faible viscosité et de synérèse sans toutefois obtenir une texture trop granuleuse (Sodini *et al.*, 2004). Puvanenthiran *et al.* (2002) ont démontré que l'élévation du ratio PS/CS augmente la fermeté et abaisse la synérèse du yogourt ferme. Ces auteurs expliquent que l'addition de protéines sériques, avant le traitement thermique, permet de créer un réseau plus dense plus résistant aux chocs et qui retient mieux le lactosérum dû à la présence de pores (espace vide qui contient le lactosérum) de plus petite taille.

1.2.3. Homogénéisation

L'homogénéisation, généralement effectuée à 60°C, utilise la pression dynamique pour fragmenter les globules de MG, inhibant ainsi la formation de crémage (séparation de la matière grasse) (Lucey & Singh, 1997). L'opération peut se faire avec un homogénéisateur à un ou deux effets. Dans les deux cas, le premier effet implique une pression élevée (13,80 mégapascal (MPa)) pour réduire la taille des globules de gras et le deuxième effet à une pression moins élevée (5 MPa) pour empêcher la coalescence des globules (Chandan & O'Rell, 2013b; Muramalla & Aryana, 2011). Après l'homogénéisation, les couches de lipoprotéines et de phospholipides ne sont plus suffisantes pour enrober complètement tous les globules nouvellement formés. Ceci est due à l'augmentation de l'aire de leur surface, or les caséines et protéines sériques viennent adhérer à la surface exposées de ces globules (Brisson & Singh, 2013). Une fois homogénéisées, la surface des globules de gras est généralement composée de 25% de caséines, 5% de protéines sériques et le reste de membranes de phospholipides endommagées (Tamime & Marshall, 1997). Barrantes *et al.* (1996) rapporte que durant la fermentation, les globules de gras homogénéisés agissent comme des grosses micelles de caséines et participent à la formation du réseau

protéique, ce qui occasionne une augmentation de la viscosité et une diminution de la synérèse du yogourt.

1.2.4. Traitement thermique

Le traitement thermique permet la destruction des microorganismes pathogènes et d'altération dans le mélange laitier en plus de provoquer la dénaturation des protéines sériques. Plusieurs études ont démontré l'impact du traitement thermique sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques du yogourt (Lee & Lucey, 2006; Vasbinder *et al.*, 2003a; Vasbinder & de Kruif, 2003; Vasbinder *et al.*, 2004; Cayot *et al.*, 2003; Lee & Lucey, 2003; Lucey, 2001; Shaker *et al.*, 2000). Ce traitement est généralement appliqué à un barème de 90-95°C pendant 5 minutes ou 30 minutes à 85°C (Tamime & Robinson, 2007a). Un traitement thermique de 90-95°C avec un temps de retenu de 5-10 min provoque la dénaturation de 70-95% des protéines sériques (Yildiz, 2010; Ozer, 2010). À partir de 70°C, une dénaturation de la β -lactoglobuline est occasionnée par l'exposition de la fonction thiol libre (S-H) initialement présente dans la cavité hydrophobe de la protéine (Brisson & Singh, 2013). Lucey *et al.* (1997) et Vasbinder et de Kruif (2003) ont démontré que la β -lactoglobuline et la α -lactalbumine dénaturées forment un pont disulfure avec le groupement thiol (-SH) de la caséine- κ de la micelle de caséine. Cependant, seulement une partie de ces protéines se complexent avec la caséine- κ , les protéines sériques restantes forment des ponts disulfures entre-elles pour produire des agrégats de protéines sériques. Selon ces auteurs, une dénaturation de 20% des β -lactoglobulines a peu d'effet sur la viscosité du yogourt, alors qu'une dénaturation entre 50 et 95% augmente énormément la viscosité. Une dénaturation élevée des protéines sériques permet de diminuer la synérèse grâce à leur capacité de lier l'eau libre (O'Rell & Chandan, 2013). La formation de complexes β -lactoglobuline/caséine κ accélère la formation du gel tel que démontré par une augmentation de la valeur de pH de gélation passant de 4,6 avec un lait non chauffé à 5,3. Tamime et Deeth (1980) ont observé que la formation de complexes β -lactoglobuline/caséine- κ occasionne une augmentation de la taille des micelles de caséines, ce qui augmente la surface de contact et favorise la formation de liens hydrophobes entre les complexes protéiques lors de la fermentation du yogourt. L'augmentation de ces liens entre les complexes protéiques entraîne une augmentation de la fermeté et de la viscosité et réduit la synérèse. Un traitement thermique insuffisant produit un yogourt ayant une faible viscosité et une synérèse élevée, similaire à un

yogourt n'ayant pas subi de traitement thermique, alors qu'un traitement excessif occasionne une texture granuleuse due à la formation de grosses particules de protéines sériques (β -lactoglobuline et la α -lactalbumine) (Hahn *et al.*, 2012). Tamime et Robinson (2007a) ont mentionné que le traitement thermique n'influence peu la structure de la MG.

1.2.5. Fermentation

L'étape de fermentation implique l'utilisation de *Streptococcus thermophilus* (ST) et *Lactobacillus delbrueckii* ssp *bulgaricus* (LB), bactéries lactiques thermophiles homofermentaires microaérophiles. Les LB sont des bacilles à Gram positif qui produisent plus d'acide lactique et sont plus résistants à l'acidité que les ST et ont une activité protéolytique plus importante. Les ST sont des coques à Gram positif capables de produire de l'acétaldéhyde et du diacétyle qui sont des composés aromatiques qui donnent le goût particulier au yogourt (Tamime & Robinson, 2007c). Après le traitement thermique, le mélange laitier est refroidi à l'aide d'un échangeur à plaque à 42-43°C pour être inoculé (Robinson *et al.*, 2007). L'étape de fermentation débute avec l'inoculation directe du mélange laitier avec une culture congelée ou lyophilisée ou indirecte à l'aide d'un ferment. Généralement, l'inoculation avec un ferment se fait de 1 à 2%, mais une faible inoculation favorise la croissance des ST et la formation de synérèse, alors qu'une inoculation ou un temps de fermentation plus élevé favorise la croissance des LB et diminue la synérèse (Chandan & O'Rell, 2013b; Lee & Lucey, 2004). Un ratio ST:LB de 50:50 est souvent employé dans l'industrie, mais un ratio de 70:30 à 90:10 est normalement utilisé en Amérique du Nord, car les consommateurs nord-américains préfèrent des yogourts moins acides (O'Rell & Chandan, 2013).

Lors de la fermentation, une symbiose se développe entre ces deux bactéries et occasionne une accélération de la production d'acide lactique (Tamime & Robinson, 2007c). Au début de l'incubation, les ST utilisent les acides aminés naturellement présents dans le lait pour leur croissance afin de produire de l'acide lactique et secrète du dioxyde de carbone et de l'acide formique comme sous-produit. Ces composés stimulent la croissance des LB et favorisent leur activité protéolytique qui transforme les caséines en acides aminés et en peptides pour stimuler à leur tour la croissance des ST (Chandan & O'Rell, 2013b). Pendant la fermentation, le lactose est utilisé comme source primaire de carbone, mais seulement 30% de celui-ci est métabolisé (Brisson & Singh, 2013; Chandan & O'Rell, 2013b).

La température d'incubation se situe normalement entre 40 et 45°C pour une durée entre 3 et 6 heures afin d'obtenir une valeur de pH de 4,6 (Lucey & Singh, 1997). La température optimale des ST et des LB est de 37 et 45°C, mais une température de 42-43°C est souvent employée pour permettre la croissance des deux bactéries (Chandan & O'Rell, 2013b). L'utilisation d'une température élevée (>45°C) durant l'incubation provoque une acidification rapide qui entraîne l'agrégation et la fusion des micelles de caséines pour former un réseau grossier, ce qui occasionne une texture granuleuse et favorise l'apparition de la synérèse (Lucey, 2001). Une température d'incubation plus basse (<40°C) entraîne une agrégation lente des micelles de caséines entourées de protéines sériques, ce qui permet la formation d'un plus grand nombre de liens interprotéiques. Ce rapprochement progressif est associé à une augmentation de la viscosité et de la fermeté du réseau et entraîne la formation de plus petits pores (espaces via lesquels le lactosérum peut se déplacer) qui ralentit le mouvement du lactosérum et diminue la formation de synérèse (Lee & Lucey, 2003).

L'acidification du mélange laitier à un pH de 6,0 occasionne une neutralisation partielle de la surface des micelles de caséines et un affaiblissement de leur répulsion électrostatique. La baisse de pH de 6,0 à 5,0 continue de neutraliser la charge nette des micelles de caséines et provoque l'affaissement du caséinomacropeptide, ce qui diminue la répulsion stérique des micelles. Subséquemment, les phosphates de calcium se solubilisent tout au long de l'acidification pour être complètement solubilisés à pH 5,0. Ceci cause une déstabilisation interne et provoque un relâchement d'une partie des caséines des micelles (Lucey, 2004b). La formation d'un gel commence avec l'atteinte d'un pH de 5,3, car les particules de protéines sériques solubles se rapprochent et forment des ponts disulfures avec les micelles de caséines. Lorsque l'acidification atteint le pH isoélectrique (pl) des caséines (4,6), les forces de répulsions des micelles sont les plus faibles. Cela provoque un rapprochement et un enchevêtrement des micelles de caséines et entraîne la formation d'un réseau tridimensionnel avec la création de liens hydrophobes, van der Waal et électrostatiques entre les protéines (van Vliet *et al.*, 1991). À la fin de l'incubation, le compte microbien devrait être entre 10^8 et 10^9 UFC/mL, (Chandan & O'Rell, 2013b). L'atteinte du pH final est très importante puisque la fermeté et la viscosité du yogourt en dépendent (Rasic & Kurmann, 1978).

1.2.6. Brassage

Le brassage du yogourt commence lorsque son pH se situe entre 4,55-4,65 ou lorsque sa teneur en acide lactique est de l'ordre de 8,0-10 g/L. Un brassage à un pH \geq 4,7 peut occasionner une texture granuleuse due à la surface des micelles de caséines qui sont partiellement chargées (O'Rell & Chandan, 2013). Ceci peut provoquer une faible répulsion électrostatique entre elles occasionnant une faible viscosité (Lucey, 2004a). Cependant, Renan *et al.* (2009), Weidendorfer *et al.* (2008), Rönnegård et Dejmek (1993), Martens (1972) et Beal *et al.* (1999), ont démontré que le brassage du yogourt à un pH entre 4,4 et 4,2 permet d'obtenir une plus grande viscosité, fermeté et une plus grande diminution de la synérèse, car une acidité plus élevée durant le brassage du yogourt produit un réseau protéique plus résistant au cisaillement. En Amérique du Nord, le brassage s'effectue à un pH autour de 4,6, car à cette valeur, les forces de répulsion entre les micelles de caséines sont les plus faibles et cela correspond aux préférences des consommateurs pour les yogourts moins acides (Tamime & Robinson, 2007b; van Vliet *et al.*, 1991). Au début du brassage en cuve, Senge (2009) (traduit de l'allemand) et Maiocchi (2003) suggèrent d'employer une vitesse de rotation plus élevée pour produire des fragments de gel plus homogènes et faciliter le pompage du yogourt.

Plusieurs auteurs ont focalisé sur le yogourt brassé et la majorité réalisait un brassage avec une cuillère, un agitateur de laboratoire, un robot culinaire ou avec un agitateur à tête perforée (Penna *et al.*, 2006; Beal *et al.*, 1999; Torres *et al.*, 2011; Hahn *et al.*, 2012; Haque *et al.*, 2001; Lee & Lucey, 2006; Remeuf *et al.*, 2003; Renan *et al.*, 2008a; Renan *et al.*, 2008b; Renan *et al.*, 2009; Serra *et al.*, 2009; Weidendorfer *et al.*, 2008). Ces types de brassage diffèrent des conditions industrielles, mais ont démontré de quelle manière la déstructuration du yogourt affecte ses propriétés rhéologiques (fermeté et viscosité apparente) et physicochimiques (acidité et synérèse). Martens (1972) a observé qu'un brassage à la main intensif (l'auteur a augmenté le nombre de mouvements ascendants et descendants) a provoqué une perte de viscosité de 77% et de fermeté de 264%. Par contre, Rasic et Kurmann (1978) ont démontré les limites du brassage manuel en comparant un brassage à la main (non spécifié) avec un brassage mécanique (avec un agitateur de laboratoire). Les auteurs ont ainsi remarqué que le brassage mécanique entraînait une diminution plus prononcée de la viscosité, d'environ 40%. Cependant, Abu-Jdayil *et al.* (2013) ont quand même démontré que

comparativement au yogourt sans gras, l'ajout de MG augmentait la résistance du réseau protéique du yogourt face aux forces de cisaillement d'un brassage à la main. De plus, De Lorenzi *et al.* (1995) ont démontré qu'avec un taux de cisaillement de 100 s^{-1} , le yogourt brassé à 4% de MG avait une viscosité plus élevée et une plus grande résistance au brassage que le yogourt brassé à 0,4% de MG.

Dans l'industrie, l'étape du brassage se fait uniquement en cuve, pour les petits volumes, ou de façon séquentielle avec un système de conditionnement pour les grands volumes (Tamime & Robinson, 2007b). Les petites entreprises utilisent généralement un brassage en cuve suivi d'un empotage à 40°C . Cette méthode demande un équipement moins coûteux et la déstructuration du yogourt est moins prononcée, mais l'acidification du yogourt se poursuit durant cette étape, ce qui ne permet pas un contrôle précis du pH, qui à son tour affecte les propriétés rhéologiques et physicochimiques du yogourt brassé (Rasic & Kurmann, 1978). Les transformateurs d'importants volumes de yogourt préfèrent utiliser un brassage séquentiel impliquant un pompage, un refroidissement et un lissage avant l'empotage. Généralement, une pompe volumétrique est préférée comparativement à une pompe centrifuge du fait d'un endommagement de la structure du gel provoquant une perte de viscosité et de fermeté lors de l'application d'une force centrifuge élevée (O'Rell & Chandan, 2013; Rasic & Kurmann, 1978). Toutefois, la vitesse et la pression engendrées par la pompe volumétrique peuvent aussi entraîner un impact négatif sur la structure du yogourt brassé. Steenbergen (1971b) (cité par Tamime et Robinson (2007b)) a observé qu'une augmentation de la vitesse de la pompe volumétrique de 100 à 400 rpm provoquait une perte de viscosité, d'environ 8% et qu'à vitesse constante (100 rpm), une élévation de la pression de 0 MPa à 0,2 MPa produisait une réduction supplémentaire de 10% de la viscosité.

L'abaissement de la température après le pompage (40 - 20°C) est généralement réalisé au sein d'un échangeur tubulaire ou à plaques (Robinson *et al.*, 2007). Afin de ralentir l'activité acidifiante des bactéries lactiques et d'éviter l'apparition d'un goût trop acidulé dans les pots de yogourts, il est généralement recommandé d'atteindre une température d'environ 20°C après le brassage, dans un temps maximal de 70 minutes (Tamime & Robinson, 2007b). L'abaissement rapide de la température à 20°C produit un traitement-choc qui enclenche une phase de ralentissement des bactéries, car durant leur phase logarithmique de croissance les bactéries sont particulièrement sensibles aux variations de l'environnement (Rasic & Kurmann, 1978). De plus, cet abaissement de la

température occasionne un gonflement des micelles de caséines dues à la diminution du nombre de liaisons hydrophobes à l'intérieur de celles-ci (Roefs *et al.*, 1990). L'accroissement de la taille des micelles de caséines entraîne une augmentation des propriétés rhéologiques et physicochimiques du yogourt brassé. Les échangeurs de chaleurs (à plaques et tubulaire) font circuler un agent de refroidissement, normalement de l'eau froide, à contre-courant pour assurer un abaissement de température constant jusqu'à l'atteinte d'une température de 20°C. Steenbergen (1971a) (cité par Tamime et Robinson (2007b)) et Senge (2009) ont démontré que le refroidissement du yogourt à l'aide d'un échangeur à plaques est plus efficace (plus rapide) qu'avec un échangeur tubulaire, mais que ce dernier produit un cisaillement environ deux fois plus faible, ce qui occasionne une moins grande perte de viscosité. L'étape du lissage implique un pompage du yogourt à travers une buse de lissage ou dans une valve de contre-pression ce qui permet de diminuer la taille des particules de protéines aux alentours de 30 µm (Van Marle, 1998). Par contre, la température du lissage ne doit pas être trop basse ($\leq 4^{\circ}\text{C}$), car elle peut occasionner un cisaillement élevé, induite par sa résistance à l'écoulement, qui se traduit en perte de viscosité et fermeté (Tamime & Robinson, 2007b). Après le lissage, le yogourt est empoté et envoyé à l'étape de refroidissement en tunnel ou dans une chambre froide.

Lorsque le yogourt est pompé à l'intérieur des conduites et de l'échangeur de chaleur, il est important de minimiser la perte de charge pour éviter la diminution des propriétés rhéologiques et physicochimiques du yogourt brassé. La perte de charge ou la perte de pression se définissent comme la conversion de l'énergie mécanique (pompage), en friction générée entre le yogourt en mouvement et les parois. Cette friction provoque un cisaillement du yogourt, qui selon l'intensité du frottement, peut entraîner une perte plus ou moins importante de la viscosité et de la fermeté et l'augmentation de la synérèse dans le yogourt brassé (Smith, 2011). Cette friction générée par l'écoulement du yogourt est influencée par la température, le débit, la présence de coude (tuyau avec un angle de 90°) et la longueur et le diamètre des conduites (Tamime & Robinson, 2007b; Rao, 2014). La force des liaisons hydrophobes entre les protéines du yogourt est plus forte à haute température ($\geq 40^{\circ}\text{C}$), car leur énergie d'activation pour briser ces liens est plus élevée. À ces températures, le yogourt devient plus résistant à la déstructuration de son réseau par le cisaillement du procédé (Rönnegård & Dejmek, 1993). À basse température, le pompage et le lissage du yogourt

produisent une grande force de cisaillement qui cause une déstructuration du yogourt, causant une perte de viscosité et fermeté et une augmentation de la synérèse due à l'augmentation de la résistance à l'écoulement et de la pression nécessaire pour atteindre un débit suffisant (Tamime & Robinson, 2007b; Van Marle, 1998). Steenbergen (1971c) a démontré que la perte de viscosité du yogourt pompé avec un débit laminaire constant est proportionnelle à la longueur de la conduite et que si cette dernière est constante, un diamètre plus élevé du tuyau occasionne une déstructuration du yogourt moins élevée. Tamime et Robinson (2007b) mentionnent qu'il faut éviter le plus possible d'introduire des coudes à angle de 90° dans une ligne de production de yogourt dû au cisaillement créé par ce type de raccordement. Steenbergen (1971c) a observé une perte de viscosité du yogourt dû à l'effet des raccordements, qui incluait les coudes. Smith (2011), Steffe *et al.* (1984) et Wilhelm *et al.* (2004) (cités par (Rao, 2014)) ont calculé que le coefficient de friction (paramètre qui permet de calculer la perte de pression) engendré par un coude à angle de 90° est 4 à 6 fois plus prononcé que celui produit par une valve en robinet ou à trois voies. Rasic et Kurmann (1978) ont rapporté que durant le pompage du yogourt, le diamètre des conduites ne doit pas varier durant tout le procédé, car avec un débit laminaire constant, un rétrécissement de la taille des tuyaux occasionne une grande force de cisaillement qui provoque une déstructuration plus prononcée du yogourt. Senge (2009) a démontré que la diminution des propriétés du yogourt brassé vient principalement de l'échangeur à plaques, car celui-ci peut produire entre 55 et 67% de la perte de charge. Senge (2009) et Afonso *et al.* (2008) ont observé que tout au long du pompage, le yogourt brassé s'écoule de façon laminaire à l'intérieur de la conduite. En industrie, un écoulement laminaire est recherché, car la perte de charge est proportionnelle au débit, alors que dans un écoulement turbulent la perte de pression est exponentiellement au carré du débit (Smith, 2011). Donc, plusieurs auteurs ont étudié l'impact du brassage à la main sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques du yogourt brassé. En revanche, peu d'entre eux ont démontré l'impact de l'écoulement du yogourt à l'intérieur des tuyaux et de leur tortuosité sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques du yogourt brassé avec et sans MG.

1.2.7. Refroidissement

Après la fermentation en pot du yogourt ferme, le refroidissement des pots se fait en un seul palier (40 à 5°C) dans un tunnel de refroidissement ou dans une chambre froide (Tamime & Robinson, 2007b). Pour le yogourt brassé, le refroidissement peut

comporter entre un et quatre paliers pour atteindre 5°C, mais généralement dans l'industrie cette étape se fait en deux paliers (Tamime & Robinson, 2007a; O'Rell & Chandan, 2013; Robinson *et al.*, 2007). Le premier refroidissement se produit durant le conditionnement et abaisse la température du yogourt à 20°C avec un échangeur de chaleur, alors que le deuxième refroidit le yogourt autour de 5°C (Lucey, 2004a).

Dans l'industrie, la durée pour abaisser la température du yogourt de 20 à 5°C varie selon la technique de refroidissement employée. Les plus utilisées sont le refroidissement en tunnel ou dans une chambre froide et toutes les deux utilisent le principe de l'air forcé comme moyen de refroidissement (Tamime & Robinson, 2007b). En général, la durée pour refroidir le yogourt à 5°C peut s'étendre de 5 à 24 h (Rasic & Kurmann, 1978). Durant le refroidissement, les liaisons hydrophobes qui se sont formées pendant la fermentation, s'affaiblissent et sont progressivement remplacées par des liens hydrogènes et électrostatiques (Roefs & Van Vliet, 1990). Simultanément, la fermeté et la viscosité du yogourt brassé augmentent et la synérèse diminue. Ceci est dû à l'abaissement de la température qui augmente la force des liens hydrophiles entre les caséines (van Vliet *et al.*, 1991). Subséquemment, un gonflement des micelles de caséine se produit à cause de l'affaiblissement des interactions hydrophobes à l'intérieur de ces micelles (Roefs *et al.*, 1990). Cela entraîne une augmentation de la surface de contact et favorise la formation de ponts d'hydrogène et disulfures supplémentaire entre les protéines sériques dénaturées et les micelles de caséines (Vasbinder & de Kruif, 2003).

En général, l'étape de refroidissement a pour but de ralentir l'acidification et l'hydrolyse des protéines par les bactéries lactiques (Tamime & Robinson, 2007a). La protéolyse se produit majoritairement durant l'étape de fermentation et celle-ci implique l'action des protéinases et des peptidases qui hydrolysent les caséines, ce qui peut diminuer la viscosité et la fermeté du yogourt (Hassan *et al.*, 1996; Ramchandran & Shah, 2009; Ramchandran & Shah, 2010; Prasad *et al.*, 2013; Amani *et al.*, 2017). Rasic et Kurmann (1978) et Tamime et Robinson (2007c) mentionnent que l'activité protéolytique des bactéries est aussi présente lors du refroidissement, mais qu'elle diminue considérablement à 10°C, d'où l'importance d'atteindre cette température le plus rapidement possible. Pour éviter une acidification trop prononcée, il est généralement recommandé de viser une valeur de pH de 4,5-4,6 une fois que les pots de yogourt sont entreposés (Tamime & Robinson, 2007b; Rasic & Kurmann, 1978).

Rasic et Kurmann (1978) rapportent qu'il est important de contrôler la durée du refroidissement puisque celle-ci dicte la valeur finale d'acidité du yogourt et qu'en général, le pH du yogourt baisse de 0,20 du début à la fin du refroidissement. De plus, la littérature mentionne qu'après le refroidissement, la valeur de pH du yogourt doit être le plus proche possible du point isoélectrique des caséines (4,6) qui permet d'obtenir une fermeté et une viscosité élevées et une faible synérèse (Tamime & Robinson, 2007a; Tamime & Robinson, 2007b; Lucey, 2004a; O'Rell & Chandan, 2013; Robinson *et al.*, 2007). Par contre, Rasic et Kurmann (1978) mentionnent qu'il ne faut pas refroidir trop vite (durée non déterminée), car ceci peut provoquer une contraction du réseau protéique qui expulse le lactosérum à l'extérieur du yogourt.

Anon (1977) (cité par Tamime et Robinson (2007b)) suggère que pour obtenir une fermeté et une viscosité élevées, la deuxième phase de refroidissement (20-5°C) doit se faire le plus lentement possible sur une période de 12 heures avec de l'air forcé à 7-10°C pendant cinq ou six heures suivies d'une température à 1 ou 2°C pour les six ou sept heures restantes. Les résultats de Martens (1972) vont dans le même sens, car il a démontré que l'abaissement du pH de 4,27 à 4,17 occasionné par un refroidissement lent de 12 h produit une fermeté et une viscosité, plus élevées du yogourt brassé. Cependant, ce même auteur n'a pas démontré si l'augmentation des propriétés rhéologiques et physicochimiques du yogourt brassé par le refroidissement lent était due à la vitesse d'acidification ou à la durée du refroidissement. De plus, Harwalkar et Kalab (1986) ont observé qu'un yogourt très acide (<4,0) démontre une fermeté plus élevée et un réseau plus grossier constitué de pores de plus grandes tailles qu'un yogourt ayant un pH de 4,5. La microstructure du yogourt très acide favorise la séparation du lactosérum, appelée synérèse spontanée, mais occasionne une plus grande résistance à la séparation du lactosérum par centrifugation, appelée synérèse forcée. Donc, puisque peu d'auteurs ont focalisé sur l'effet d'un refroidissement lent, il est difficile de bien connaître l'impact de l'acidification produit lors du refroidissement sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques des yogourts brassés.

1.2.8. Entreposage

Lorsque le refroidissement est complété, le yogourt est entreposé à $\leq 5^{\circ}\text{C}$ (Rasic & Kurmann, 1978). Généralement, durant l'entreposage le compte microbien diminue d'environ un log à la troisième semaine (Chandan & O'Rell, 2013b). Tamime et Robinson (2007a) ont mentionné qu'une post-acidification (acidification après le

refroidissement), une augmentation de l'hydratation des micelles de caséines et la formation de liens hydrophiles se produisent majoritairement dans les premières 24 à 48 h d'entreposage. Cela entraîne une augmentation de la fermeté et de la viscosité ainsi qu'une diminution de la synérèse du yogourt (Tamime & Robinson, 2007a). Ramchandran et Shah (2009), Ramchandran et Shah (2010), Barrantes *et al.* (1996), Amani *et al.* (2017) et Prasad *et al.* (2013) ont observé une augmentation de la viscosité et de la fermeté et une diminution de la synérèse du yogourt ferme après 21 jours d'entreposage. Par contre, les différentes compositions de yogourt entre les études scientifiques ont donné des comportements différents sur les yogourts brassés lors de leur entreposage. Certains auteurs ont obtenu une augmentation de la fermeté et de la viscosité ainsi qu'une diminution de la synérèse tandis que d'autres ont observé un effet inverse au 21^e jour d'entreposage. Les résultats contradictoires entre les auteurs démontrent l'importance d'approfondir plus sur l'évolution des propriétés rhéologiques et physicochimiques du yogourt pendant l'entreposage.

1.3. Problématique

Plusieurs auteurs ont démontré l'effet de la standardisation, de l'homogénéisation et de du traitement thermique sur les propriétés du yogourt brassé avec et sans MG. Dans ces études, le brassage du yogourt a été majoritairement réalisé avec une cuillère, un agitateur de laboratoire, un robot culinaire ou un agitateur à tête perforée. Cependant, peu de ces études ont reproduit en laboratoire un brassage simulant le procédé industriel qui implique l'utilisation de conduite linéaire et tortueuse de différentes longueurs. Quant au refroidissement, la majorité des auteurs ont employé un bain d'eau glacé ou un réfrigérateur pour diminuer la température des yogourts. Leurs études donnent peu d'information sur l'évolution des propriétés rhéologiques et physicochimiques du yogourt selon la durée de son refroidissement.

1.4. But, hypothèse et objectifs

1.4.1. But

Le but de ce projet était d'acquérir de nouvelles connaissances sur l'impact de la vitesse de refroidissement d'un yogourt à différentes teneurs en matière grasse, brassé à l'aide d'un banc d'essai pilote composé de conduites linéaires ou avec une tortuosité comportant 18 coude sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques.

1.4.2. Hypothèse

En modifiant la vitesse de refroidissement, la teneur en matière grasse et la tortuosité du banc d'essai pilote, il est possible de modifier l'évolution les propriétés rhéologiques et physicochimiques du yogourt brassé durant l'entreposage.

1.4.3. Objectif général

Étudier l'impact de la matière grasse, de la tortuosité et de la vitesse de refroidissement sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques du yogourt brassé, avec un banc d'essai pilote.

1.4.4. Objectif 1

Déterminer l'impact de différentes vitesses de refroidissement durant l'entreposage de yogourts sans gras, brassés avec un banc d'essai pilote sur l'évolution de l'acidité, la synérèse, la fermeté et la viscosité.

1.4.5. Objectif 2

Déterminer l'impact de la tortuosité et de la vitesse de refroidissement, durant l'entreposage, sur la synérèse, la fermeté et la viscosité des yogourts avec et sans gras.

Plusieurs études ont démontré que le traitement thermique, l'homogénéisation et la fermentation ont un impact sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques du yogourt. Pour cette raison, les paramètres de ces étapes étaient identiques pour toutes les productions.

Chapitre 2 : Impact de la vitesse de refroidissement et du temps d'entreposage sur les propriétés rhéologiques et la synérèse d'un yogourt brassé sans matière grasse.

2. Résumé

Peu d'études ont évalué l'impact de l'acidification durant le refroidissement sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques des yogourts brassés. Dans ce chapitre, un banc d'essai et une chambre environnementale ont été utilisés afin de reproduire un brassage et un refroidissement industriel. L'objectif était de déterminer l'impact de différentes vitesses de refroidissement sur le développement de l'acidité, la fermeté, la viscosité apparente et la synérèse des yogourts brassés. Tous les yogourts ont été standardisés à 14% de solides totaux (ST), 3,10% de caséines (CS), 1,10% de protéines sériques (PS), avec un ratio CS/PS 2,8, 4,20% de protéines totales et 0% de matière grasse. Les yogourts ont tous subi les mêmes étapes d'homogénéisation (3,45 MPa et 13,80 MPa), de traitement thermique (85°C; 20 minutes), d'inoculation (1,5%) et de fermentation ($3,50 \pm 0,25$ h à 41°C). Lorsque le pH a atteint une valeur de 4,7, le yogourt a été pompé (~1 L/min), lissé (filtre de 425 µm) et empoté (~175 mL) à l'aide d'un banc d'essai pilote. Un refroidissement en deux stades a été réalisé dans une chambre environnementale. Un premier stade a refroidi les yogourts de 35 à 20°C en 30 minutes alors que le deuxième stade a permis d'abaisser la température des yogourts de 20 à 5°C en 5 (Y5), 24 (Y24) ou 72 h (Y72). Pour chaque production de yogourt, des mesures de pH, d'acidité titrable, de fermeté, de viscosité et de synérèse ont été effectuées avant (35°C), pendant (20°C) et après (5°C) le refroidissement au jour 0 et pendant un entreposage de 21 jours à 5°C. Des dénombrements bactériens ont également été effectués. À l'étape du refroidissement, les yogourts analysés à 35°C ont obtenu une viscosité et une fermeté la plus basse et la synérèse la plus élevée, alors que les yogourts analysés à 5°C ont obtenu une viscosité et une fermeté la plus élevée et une synérèse la plus basse. Après un entreposage de trois semaines, une augmentation de la viscosité et de la fermeté a été observée, alors que la synérèse et les comptes microbiens étaient stables. Au 21^{ème} jour, la fermeté du yogourt Y5 était la plus basse, tandis que la viscosité et la synérèse des yogourts n'ont pas été affectées par la vitesse de refroidissement. Le banc d'essai pilote a donné lieu à une simulation d'un brassage de type industriel répétable à l'échelle laboratoire et la chambre environnementale a permis de démontrer l'impact des vitesses de refroidissement rapides et lentes et de connaître leur contribution sur la fermeté et la viscosité des yogourts brassés.

2.1. Introduction

Au Canada, la production de yogourt a augmenté de plus de 50% depuis 2001 et celui-ci est commercialisé, par ordre d'importance, sous diverses formes; brassé, ferme, à boire et glacé (A.A.C., 2006). En général, les consommateurs et les industriels considèrent la présence de lactosérum à la surface du yogourt (synérèse) et une faible viscosité et fermeté comme des défauts de qualité (Robinson & Itsaranuwat, 2007; Lee & Lucey, 2010). Ces imperfections proviennent souvent du procédé de fabrication qui implique une standardisation de la composition, une homogénéisation, un traitement thermique, une fermentation, un brassage (yogourt brassé seulement), un refroidissement et un entreposage. L'étape de standardisation est essentielle, car celle-ci permet d'ajuster la teneur en solides totaux qui influencent les propriétés rhéologiques et physicochimiques du yogourt (Harwalkar & Kalab, 1986; Kamarides *et al.*, 2007; De Lorenzi *et al.*, 1995; Puvanenthiran *et al.*, 2002; Remeuf *et al.*, 2003; Shaker *et al.*, 2000). L'homogénéisation est aussi une étape importante, car elle permet à la matière grasse de contribuer à la formation du réseau dû à l'adsorption de caséines et de protéines sériques à la surface des globules de gras (O'Rell & Chandan, 2013; Tamime & Marshall, 1997; Barrantes *et al.*, 1996). L'effet du traitement thermique sur les protéines sériques et sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques des yogourts a été démontré par plusieurs auteurs (Lee & Lucey, 2003; Shaker *et al.*, 2000; Hahn *et al.*, 2012; Lee & Lucey, 2006; Cayot *et al.*, 2003; Vasbinder *et al.*, 2003a; Vasbinder & de Kruif, 2003; Vasbinder *et al.*, 2003b; Vasbinder *et al.*, 2004). Cette étape occasionne une dénaturation des protéines sériques, ce qui provoque la formation de ponts disulfures avec les caséines permettant aux protéines sériques de contribuer à la formation du réseau protéique, donc à la gélification du yogourt. Lors de l'acidification du mélange laitier, il se produit une solubilisation du phosphate de calcium dans les micelles de caséines, ce qui neutralise les ions négatifs présent sur leur surface provoquant leur déstabilisation et favorisant leur rapprochement (Harwalkar & Kalab, 1986; Schellhaass & Morris, 1985; Roefs *et al.*, 1990; Roefs & Van Vliet, 1990; van Vliet *et al.*, 1991). Les interactions hydrophobes entre les micelles de caséines sont favorisées entraînant la formation d'un réseau protéique gélifié. Afonso et Maia (1999) et Renan *et al.* (2009) ont démontré que l'étape du brassage brise les interactions entre les protéines du réseau et fragmente le gel en plusieurs particules de différentes tailles. La majorité des études ont focalisé sur le yogourt ferme, mais très peu sur le brassé, car le brassage de type industriel est difficile

à reproduire. En laboratoire, cette étape a été souvent reproduite avec une cuillère, un agitateur de laboratoire, un robot culinaire ou avec un agitateur à tête perforée (Penna *et al.*, 2006; Beal *et al.*, 1999; Torres *et al.*, 2011; Hahn *et al.*, 2012; Haque *et al.*, 2001; Lee & Lucey, 2006; Remeuf *et al.*, 2003; Renan *et al.*, 2008a; Renan *et al.*, 2008b; Renan *et al.*, 2009; Serra *et al.*, 2009; Weidendorfer *et al.*, 2008). Ces méthodes de brassage ne représentent pas la réalité industrielle qui implique des étapes séquentielles de pompage et de lissage sur les propriétés rhéologiques (viscosité apparente et fermeté) et physicochimiques (synérèse, pH) du yogourt brassé. Après le brassage et l'empotage du yogourt, un refroidissement est entamé en dessous de 10°C afin de ralentir l'acidification du yogourt provoquée par les bactéries lactiques thermophiles. Toutefois, même ralentie cette acidification se poursuit et celle-ci est souvent considérée comme indésirable, car elle peut provoquer l'apparition d'un goût trop acidulé (Tamime & Robinson, 2007a; Rasic & Kurmann, 1978). À l'échelle laboratoire, Afonso et Maia (1999), Sandoval-Castilla *et al.* (2004), Beal *et al.* (1999), Remeuf *et al.* (2003), Serra *et al.* (2009), Haque *et al.* (2001), Penna *et al.* (2006), Cayot *et al.* (2003), Hahn *et al.* (2012), Schellhaass et Morris (1985), Lee et Lucey (2006) ont reproduit l'étape de refroidissement à l'aide d'un réfrigérateur ou par immersion du yogourt dans un bain d'eau glacée, ce qui ne représente pas la réalité industrielle qui utilise souvent un refroidissement en tunnel. Rasic et Kurmann (1978) et Robinson *et al.* (2007) recommandent d'employer un refroidissement rapide pour minimiser l'acidification. Or la littérature rapporte peu d'information sur l'impact de l'acidification produit lors de différentes vitesses de refroidissement sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques des yogourts. Kurmann (1967) et Martens (1972) ont remarqué qu'un yogourt brassé refroidi lentement obtient une viscosité et une fermeté supérieure à celle d'un yogourt refroidi rapidement, mais ces auteurs n'ont pas été capables d'affirmer si cette augmentation était due au développement de l'acidité ou au temps de refroidissement plus long. Un refroidissement trop rapide augmenterait la synérèse, mais la littérature offre peu d'information sur la vitesse requise pour l'occasionner (Kurmann, 1967). Plusieurs auteurs ont analysé le yogourt refroidi à différentes températures et ils ont remarqué qu'une augmentation de la température occasionne une diminution de la viscosité, de la fermeté et de la rétention d'eau (Ramaswamy & Basak, 1992; Penna *et al.*, 2006; Afonso & Maia, 1999; Afonso *et al.*, 2008; Roefs & Van Vliet, 1990; Roefs *et al.*, 1990; Renan *et al.*, 2009). Cependant, leurs résultats ne reflètent pas la réalité industrielle, car ces auteurs ont fait varier la température du

yogourt avant son analyse à l'aide d'un bain thermique ou d'un système de régulation thermique. La littérature rapporte donc peu d'information sur l'évolution des propriétés rhéologiques et physicochimiques du yogourt brassé durant son refroidissement.

Il a été démontré que les propriétés rhéologiques et physicochimiques du yogourt brassé varient avec le temps l'entreposage (Renan *et al.*, 2009; Beal *et al.*, 1999; Renan *et al.*, 2008a; Renan *et al.*, 2008b; Martens, 1972; Afonso & Maia, 1999). Weidendorfer *et al.* (2008) ont remarqué qu'après un entreposage de 21 jours la viscosité augmente et la synérèse diminue. Par contre, Serra *et al.* (2009) ont observé une diminution de la viscosité et de la fermeté et une augmentation de la synérèse après un entreposage de 14 jours. Dans ce chapitre, les résultats permettront d'approfondir les connaissances de l'effet d'entreposage sur l'évolution des propriétés rhéologiques et physicochimiques des yogourts.

L'objectif de cette étude était de déterminer l'effet de différentes vitesses de refroidissement (une rapide et deux lentes) de yogurts sans gras brassés avec un banc d'essai pilote, sur le développement de l'acidité et sur l'évolution de la viscosité, de la fermeté et de la synérèse. La composition des mélanges laitiers et les traitements d'homogénéisation et thermique ainsi que la durée de la fermentation étaient identiques lors de la production des tous les yogurts pour minimiser leurs effets sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques du yogourt brassé.

2.2. Matériels et méthodes

2.2.1. Ingrédients laitiers

Les yogurts brassés ont été produits à partir de lait écrémé (LÉ) (Chalifoux, Sorel-Tracy, Québec, Canada) dont la composition a été standardisée avec de la poudre de lait écrémé «low heat» (PLÉ) (Agropur, St-Hyacinthe, Québec, Canada), du lactose de grade 300 (Saputo Inc., Montréal, Québec, Canada) et d'un concentré protéique de lactosérum (CPL) à 34% (Agropur, St-Hyacinthe, Québec, Canada). La composition du lait écrémé et des ingrédients est présentée au tableau 2.1. Dans ce tableau, la PLÉ, le CPL et le lactose n'ont pas d'écart types, car ils provenaient tous d'un même lot.

2.2.2. Microorganismes

Une culture mixte lyophilisée de bactéries lactiques thermophiles, *Streptococcus thermophilus* et *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus*, (Yo-Dulce, Bierna, Saint-Hyacinthe, Québec, Canada) dans un ratio respectif de 95:5 a été utilisée et entreposée à -20 °C.

2.2.3. Préparation du ferment

Le ferment a été produit à partir de lait reconstitué à 12% (p/p). Le lait reconstitué a été stérilisé à 110°C pendant 6 minutes et refroidi à 41°C avant d'être ensemencé à un taux de 0,1% (p/p) avec la culture lyophilisée puis incubé à 41°C dans un incubateur (Isotemp incubator modèle 225D, Fisher, Hampton, New Hampshire, É-U) jusqu'à l'obtention d'une valeur de pH de 4,7. Après $4,75 \pm 0,50$ h, le ferment a été entreposé à 4°C jusqu'au moment de la production de yogourts.

2.2.4. Préparation du mélange laitier

Pour la production du yogourt, le lait écrémé a été standardisé à 14% de solides totaux, avec une concentration de protéines sériques de 1,1% et de caséines à 3,1% pour obtenir un ratio de caséines/protéines sériques de 2,8 et une teneur en protéines totales de 4,2%. Les quantités de chaque ingrédient laitier ajouté au lait écrémé pour obtenir 10 kg de mélange laitier sont présentées au tableau 2.2.

Tableau 2.1: Composition du lait écrémé et des différents ingrédients laitiers.

Constituants (%)	Ingrédients ¹			
	LÉ	PLÉ	CPL	Lactose
Caséines	$2,11 \pm 0,09$	26,68	0	0
Protéines sériques	$0,62 \pm 0,02$	6,84	30,7	0
Solides totaux	$8,52 \pm 0,16$	95,57	97,40	99,82

¹ LÉ, Lait écrémé; PLÉ, Poudre de lait écrémé; CPL, Concentré protéique de lactosérum

Tableau 2.2 : Quantités de lait écrémé et de chaque ingrédient laitier mélangés pour obtenir 10 kg de mélange laitier.

Ingrédients	Poids (kg)
Lait écrémé	8,72
Poudre de lait écrémé	0,40
Concentré protéique de lactosérum	0,07
Lactose	0,17
Ferment	0,14

Pour faciliter la solubilisation des ingrédients en poudre, le lait écrémé a été préalablement chauffé à 60°C dans 2 cuves de 5 litres adaptées à l'incubateur à ferment (Compagnie Wiesby, Allemagne de l'Est). Les ingrédients en poudre ont été ajoutés au lait de chaque cuve puis celui-ci a été mélangé pendant cinq minutes avec une tige agitatrice constituée d'une plaque perforée. Après brassage, chaque cuve a subi une homogénéisation séquentielle à 60°C à 3,45 MPa et 13,80 MPa avec un homogénéisateur portatif (EmulsiFlex C-50, Avestin, Ottawa, Canada). Dans ce chapitre, la séquence des pressions a été inversée par erreur. Puisque le mélange laitier ne contient pas de matière grasse, cette erreur de séquence n'influencerait pas les résultats. Par la suite, les deux cuves ont été chauffées à 85°C pendant 20 minutes en les immergeant dans l'eau de l'incubateur à ferment préalablement ajustée à 95°C. Le suivi de la température a été réalisé à l'aide du thermocouple de l'appareil. Subséquemment, les cuves ont été refroidies rapidement en les immergeant dans de l'eau froide pour obtenir une température de 41°C.

2.2.5. Production de yogourt

Lorsque la température désirée a été atteinte, le mélange laitier a étéensemencé à un taux de 1,5% (p/p) avec le ferment (section 2.2.3) et incubé à 41°C dans le même incubateur à ferment ayant servi à chauffer le mélange à yogourt, mais dont la température était maintenue à 41°C. Le pH a été mesuré toutes les heures.

Lorsque le pH du yogourt a atteint une valeur de 4,7, les deux cuves ont été retirées de l'incubateur. Le temps d'incubation était en moyenne de $3,50 \pm 0,25$ h.

2.2.6. Banc d'essai

Pour brasser le yogourt, un banc d'essai à l'usine pilote a été utilisé (figure 2.1). Il était constitué d'un réservoir conique de 50 litres, d'une buse de lissage de 425 µm, d'une tuyauterie et de raccordement ayant un diamètre de 2,54 cm connectés à une pompe positive à engrenage (M200, Alfa Laval, Brossard, Québec, Canada) couplée d'un variateur de vitesse réglé à 10 (SMVector convertisseur de fréquence, Lenze AC Tech, Boise, Idaho, É-U). L'utilisation d'un banc d'essai qui, incluant un pompage et un lissage, permettait de contrôler et de produire un brassage homogène qui se rapproche de la réalité industrielle.



Figure 2.1 : Banc d'essai utilisé pour la production de yogourt brassé.

2.2.7. Brassage et refroidissement du yogourt

Après l'incubation, le yogourt à 41°C de chaque cuve a été transvidé minutieusement dans le réservoir du banc d'essai avant d'être pompé (~1 L/min) à travers la buse de lissage et empoté dans des pots de 175 mL (Plastipak, GenPak, Boucherville, Québec, Canada). Par la suite, les pots ont été placés dans une chambre environnementale (RTH-16P-2, Burnsco, Kanata, Ontario, Canada) (figure 2.2). À cette étape, la température des yogourts était à 35°C. Parmi les pots de yogourt brassé, trois d'entre eux, choisis au hasard, étaient munis d'un thermocouple (Type T, Omega Engineering, Stamford, Connecticut, É-U) fixé au couvercle permettant de suivre en continu l'évolution de la température du yogourt pendant le refroidissement. Trois thermocouples étaient aussi installés dans la chambre environnementale pour mesurer la température ambiante (air forcé). Tout au long du refroidissement, le suivi des températures à l'intérieur des pots et de l'air forcé dans la chambre environnementale a été fait avec un enregistreur de température portable (OM-Daqpro-5300, Omega Engineering, Stamford, Connecticut, É-U).



Figure 2.2: Pots de yogourts avec et sans thermocouples à l'intérieur de la chambre environnementale.

L'utilisation de la chambre environnementale a permis de moduler la température consignée (air forcé) avec précision, permettant ainsi un contrôle précis sur les vitesses de refroidissement. Ceci a permis de connaître l'évolution des propriétés rhéologiques et physicochimiques du yogourt selon sa température en fonction de la vitesse de refroidissement impliquée. Trois vitesses de refroidissement ont été produites, dont une rapide et deux lentes, pour refroidir les yogourts de 35 à 5°C en deux stades. Le premier stade nécessitait un refroidissement rapide, similaire à l'industrie, afin de diminuer la température des pots de yogourts de 35 à 20°C en 30 minutes avec une température consignée à 0°C. Le deuxième stade consistait à abaisser la température des pots de yogourts de 20 à 5°C en trois durées différentes; 5, 24 et 72 heures.

La vitesse de refroidissement rapide, présentée à la figure 2.3a, impliquant un temps de refroidissement de 5 h (Y5) pour atteindre une température de 5°C. Cette condition pourrait se rapprocher d'un refroidissement en tunnel utilisé en industrie. Une vitesse de refroidissement en 24 h (Y24) pour atteindre une température de 5°C présentée à la figure 2.3b a aussi été évaluée. Cette condition pourrait représenter le refroidissement que subit un pot de yogourt au milieu d'une boîte de carton qui est situé au centre d'une palette positionnée entre deux autres palettes de yogourt dans un entrepôt à 5°C. Durant le refroidissement, un plateau à 10°C pendant 2,5 heures a été produit pour simuler le décalage thermique occasionné par les boîtes de carton. Une vitesse de refroidissement exagérément longue de 72 h (Y72) (figure 2.3c) a aussi été évaluée.

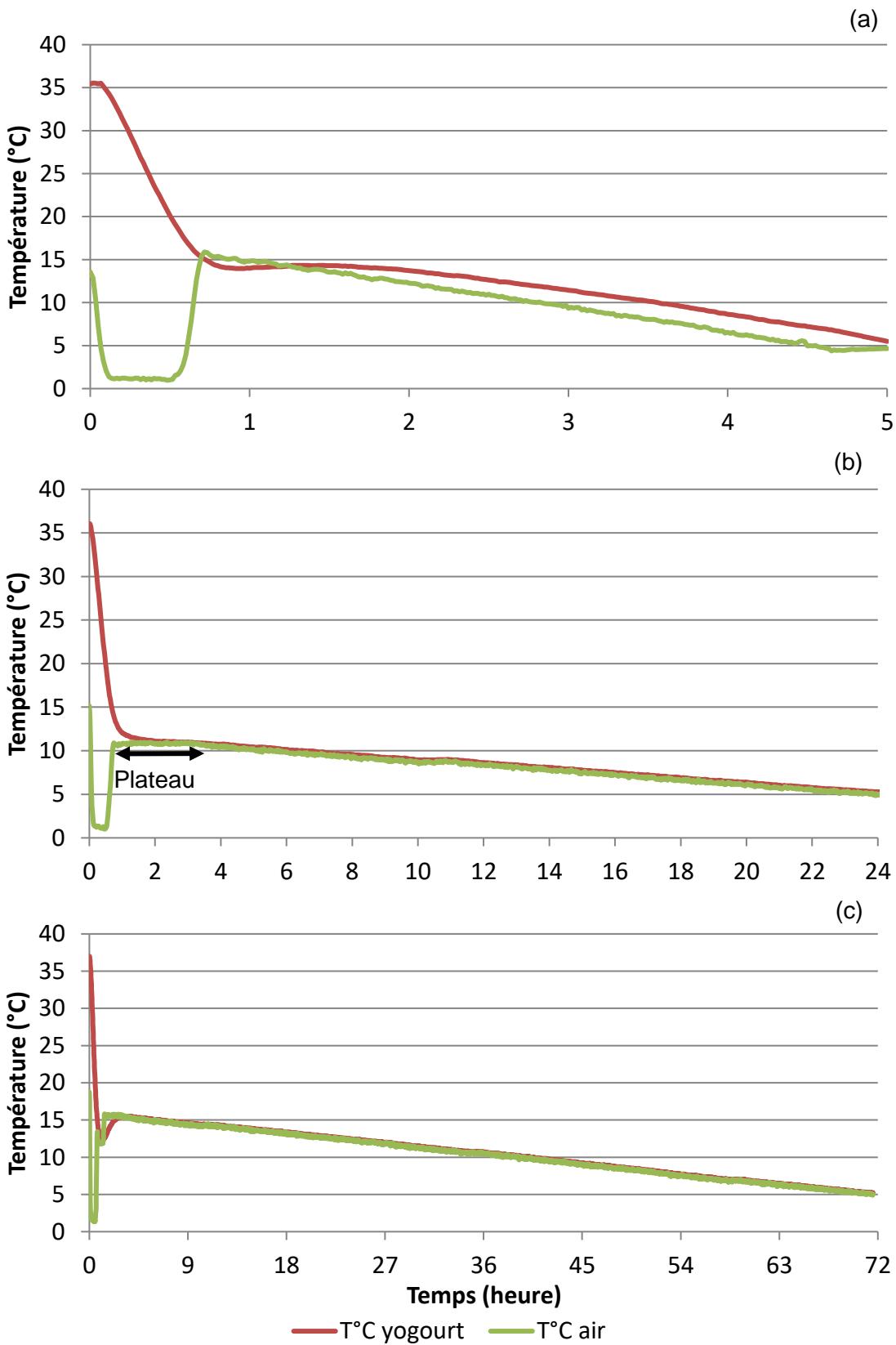


Figure 2.3: Refroidissement des yogurts (175 mL) avec une vitesse de refroidissement de : 5 (a), 24 (b) et 72 (c) heures.

Les étapes de la programmation des vitesses de refroidissement pour la chambre environnementale sont présentées dans les tableaux de l'annexe 1. Avant le début du refroidissement, 11 pots de yogourt à 35°C ont été prélevés aléatoirement dans la chambre pour effectuer immédiatement différentes analyses. Lorsque la température des yogourts a atteint 20°C, 11 nouveaux pots ont été prélevés aléatoirement dans la chambre et analysés. Une fois le refroidissement complété, 11 autres pots ont été prélevés et analysés immédiatement à 5°C. Les pots restants ont été entreposés dans une chambre froide à 5°C pendant 21 jours.

2.2.8. Analyses

2.2.8.1. pH et acidité titrable

Lors de la fermentation du yogourt, le pH a été mesuré avec un pH-mètre portable équipé d'une électrode d'Ag/AgCl (Symphony SP90M5, VWR, Radnor, Pennsylvanie, É-U). Pendant l'entreposage, l'acidité titrable (FIL 150:1991) et le pH (AOAC 981.12) ont été mesurés en duplicita selon les méthodes officielles de l'AOAC et de la Fédération internationale de Laiterie (International Dairy Federation, 1991); Association of Official Analytical Chemists (AOAC), 2000) avec un pH-mètre titrateur (DL-15, Mettler-Toledo SAS, Anachemia/VWR, Mississauga, Canada). Les mesures de pH ont été effectuées en insérant une électrode et une sonde de température dans 10 g de yogourt. Par la suite, 10 g d'eau distillée ont été ajoutés pour déterminer l'acidité titrable par titration de l'échantillon avec du NaOH 1/9 N (AccuSPEC, Hawthorne, Pennsylvanie, É-U) jusqu'à l'atteinte d'une valeur de pH de 8,6. Les résultats ont été exprimés en acide lactique (g/L).

2.2.8.2. Viscosité apparente

La viscosité apparente a été mesurée à l'aide d'un rhéomètre (Physica MCR 301, Anton Paar, Graz, Autriche) connecté à un système de mesure à cylindres coaxiaux DIN (28,924 mm) (modèle MCR 301, Anton-Paar, Graz, Autriche) et branchés à un système de contrôle thermique Peltier (CC27/T200/SS, Anton Paar, Graz, Autriche) pour contrôler la température. La température du rhéomètre a été ajustée à 35, 20 ou 5°C selon l'échantillon prélevé. L'analyse a commencé par le prélèvement de 21,22 g de yogourt à l'aide d'un échantilleur spécialement conçu pour cette opération (Gentès et

al., 2011) qui minimise la destruction du gel lors du transfert dans le cylindre concentrique. Un temps de repos de 5 minutes a été accordé avant d'appliquer un taux de cisaillement graduel de 0 à 100 s⁻¹ pendant 10 minutes. La viscosité à une vitesse de cisaillement de 10,5 s⁻¹ a été sélectionnée pour le calcul de la viscosité (Everett & McLeod, 2005). Ce calcul a été possible à partir de la modélisation de la courbe de viscosité au moyen de la formule de la loi de puissance représentée par l'équation (1) :

$$\text{Viscosité apparente (Pa * s)} = \frac{K * 10,5^{(n)}}{10,5} \quad (1)$$

K = Coefficient de consistance (Pa.s) N = indice de comportement d'écoulement

10.5 = Vitesse de cisaillement (s⁻¹)

La valeur de 10,5 s⁻¹ a été choisie, car cette valeur représente un vitesse pouvant se retrouver dans la région de cisaillement d'un yogourt qui s'écoule à l'intérieur des conduites industrielles (René, 1997).

2.2.8.3. Fermeté

La fermeté a été déterminée avec un texturomètre TA-XT2 (Texture Technology Corp., Scarsdale, New York, É-U). Une force de compression a été appliquée sur cinq différents pots de yogourt à l'aide d'une sonde cylindrique (25 mm de diamètre par 35 mm de hauteur) reliée à une cellule de charge de 5 kg. La vitesse de pénétration était de 1 mm/s avec une force de déclenchement de 0,049 Newton (Bullard, 2011). La force maximale en Newton (N) a été enregistrée après une pénétration de 10 mm suivie d'une pause de deux secondes (Hess *et al.*, 1997). La fermeté (N/m²) a été calculée selon l'équation (2):

$$\text{Fermeté (N/m}^2\text{)} = \frac{\text{Force maximale obtenue (N)}}{\text{Surface de contact de la sonde (4,91 X }10^{-4}\text{m}^2\text{)}} \quad (2)$$

2.2.8.4. Synérèse

La synérèse a été quantifiée par centrifugation selon la méthode de Bullard (2011). Un échantillon de 25 g de yogourt, prélevé à l'aide du même échantillonneur utilisé pour l'analyse de la viscosité apparente, a été transféré à l'intérieur d'un tube Falcon à fond conique de 50 mL (Fisher Brand, Life Technologies Inc., Burlington,

Ontario). Les tubes ont été centrifugés à 1000 rpm (185 g) pendant 20 minutes à 5°C avec une centrifugeuse Beckman Coulter (modèle Avanti J-26 XPI, godets JS-7,5 coniques, Mississauga, Ontario, Canada). L'analyse a été réalisée en duplicita. Le surnageant a été pesé et la synérèse a été calculé avec l'équation (3) :

$$\% \text{ synérèse} = \frac{\text{Poids de lactosérum recueilli (g)}}{\text{Poids de yogourt (g)}} \times 100 \quad (3)$$

2.2.8.5. Compte bactérien

Le dénombrement microbien a été effectué avec la méthode 117B de la FIL (International Dairy Federation, 1997). Une solution d'eau peptonée (Bacto™ no 211677) à 0,1% (p/v) a été utilisée pour produire des bouteilles à dilution d'eau peptonée contenant approximativement 15 billes de verres de 4 mm de diamètre. Ces bouteilles ont ensuite été stérilisées à l'autoclave à 121°C pendant 15 minutes. Après le transfert de l'échantillon de yogourt dans une bouteille de dilution, la bouteille a été agitée 40 fois de haut en bas pour assurer la destruction des chaînes bactériennes grâce à la présence de billes (St-Gelais & Haché, 2006). La souche *Streptococcus thermophilus* a été dénombrée sur milieu gélosé M17 (Difco™ no 218561, Le pont de Claix, France) contenant 0,5% de lactose (Difco™ no 215620, Le pont de Claix, France), alors que la souche *Lactobacillus delbrückii* subsp. *bulgaricus* a été dénombrée sur milieu gélosé MRS (Difco™ Lactobacilli no 288130, Le pont de Claix, France) acidifié à 5,5 de pH par l'ajout d'acide lactique glacial (Fisher Scientific Canada, Nepean, Ontario, Canada). Les boîtes de Pétri (Sarstedt Inc., Montréal, Québec, Canada) ont été ensemencées dans la masse et incubées dans une hotte anaérobie (modèle 1025, Forma Scientific, Waltham, Massachusetts, É-U) pendant 48 heures à 37°C. Les comptes ont été exprimés en unité formatrice de colonies par millilitre (UFC/mL).

2.2.8.6. Analyse statistique

Deux productions de yogourt ont été réalisées par semaine sur une période de six semaines pour compléter quatre répétitions. Pour chaque jour de production, la vitesse de refroidissement du yogourt a été choisie aléatoirement.

Une comparaison des moyennes a été utilisée pour déterminer l'effet du procédé au jour 0. Celle-ci impliquait la variable indépendante de la température (35°C, 20°C et

5°C) sur les valeurs de pH, d'acidité titrable, de synérèse, de fermeté et de viscosité apparente.

Un dispositif expérimental en tiroir (split-plot) a été utilisé pour déterminer l'effet de l'entreposage. Celui-ci impliquait les variables indépendantes de la vitesse de refroidissement (Y5, Y24 et Y72) et du temps d'entreposage (jour 0 et 21) sur les mêmes analyses incluant le dénombrement bactérien. Dans ce dispositif expérimental, la parcelle principale était la vitesse de refroidissement et la sous-parcelle le temps d'entreposage.

L'analyse de variance a été testée à $P \leq 0,05$ et les analyses statistiques effectuées avec la procédure GLM (general linear model) du logiciel SAS (Version 2.0.4, 2003; SAS Institute Inc., SAS Campus Drive, Cary, Caroline du Nord, É-U).

2.3. Résultats de l'effet du procédé envers les propriétés rhéologiques et physicochimiques des yogourts

Les valeurs cibles de caséines, protéines sériques, ainsi que leur ratio, solides totaux, protéines totales et matière grasse ont respectivement été atteintes; $3,17 \pm 0,02$, $1,13 \pm 0,01$, $2,81 \pm 0,02$, $14,6 \pm 0,1$, $4,22 \pm 0,02$ et $0,184 \pm 0,031\%$.

Le tableau 2.3 présente les valeurs de pH, d'acide lactique, de synérèse, de fermeté et de viscosité obtenues au début de l'étape du refroidissement à 35°C , après le premier stade de refroidissement à 20°C et à la fin du refroidissement à 5°C , et ce pour les trois vitesses de refroidissement (5 h, 24 h et 72 h). Un effet significatif de la température ($P \leq 0,05$) a été observé.

En général, la teneur en acide lactique la fermeté et la viscosité ont augmenté significativement pour tous les yogourts pendant le refroidissement, alors que les valeurs de pH et de synérèse diminuaient. Par contre, la valeur d'acide lactique du yogourt à 35°C n'était pas significativement différente de celle du yogourt à 20°C .

Tableau 2.3 : Valeurs des propriétés rhéologiques et physicochimiques des yogourts pendant leur refroidissement à 35°C , 20°C et à la fin du refroidissement à 5°C .

Température des yogourts ($^{\circ}\text{C}$)	pH	Acidité titrable (g/l)	Indice de synérèse (%)	Fermeté (N/m^2)	Viscosité (Pa^*s)
35	$4,70^{\text{A}} \pm 0,01$	$7,7^{\text{B}} \pm 0,53$	$33^{\text{A}} \pm 0,79$	$256^{\text{C}} \pm 16$	$0,4^{\text{C}} \pm 0,05$
20	$4,60^{\text{B}} \pm 0,01$	$7,6^{\text{B}} \pm 0,53$	$27^{\text{B}} \pm 0,79$	$362^{\text{B}} \pm 16$	$0,9^{\text{B}} \pm 0,05$
5	$4,47^{\text{C}} \pm 0,01$	$8,4^{\text{A}} \pm 0,53$	$19^{\text{C}} \pm 0,79$	$536^{\text{A}} \pm 16$	$1,7^{\text{A}} \pm 0,05$

^{A-C}: Les moyennes qui ne partagent pas la même lettre sont significativement différentes ($P \leq 0,05$).

2.4 Résultats de l'effet de l'entreposage

2.4.1 pH, acidité titrable et dénombrement bactérien

Pour le pH, une interaction double significative ($P \leq 0,05$) a été observée entre la vitesse de refroidissement des yogourts (Y5, Y24 et Y72) et leur temps d'entreposage (tableau 2.4).

Au jour 0, les valeurs de pH pour les yogourts Y5 et Y24 étaient significativement comparables, mais plus élevées que pour le yogourt Y72 (tableau 2.4). Durant l'entreposage, le pH a chuté dans tous les yogourts. La diminution de pH pour les yogourts Y5, Y24 et Y72 a été, respectivement, de 0,28, 0,24 et 0,07 unité. Tout comme au jour 0, la valeur de pH du yogourt Y72 au jour 21 était significativement la plus basse. Cependant, la valeur de pH du yogourt Y72 au jour 0 n'était pas significativement différente des valeurs de pH au jour 21 des yogourts Y5 et Y24.

Tableau 2.4 : Impact de la vitesse de refroidissement de 5, 24 et 72 h sur les valeurs de pH des yogourts lors de l'entreposage.

Temps d'entreposage (jour)	Type de yogourt	pH
0	Y5	4,55 ^A ± 0,019
	Y24	4,57 ^A ± 0,025
	Y72	4,30 ^B ± 0,019
21	Y5	4,27 ^{BC} ± 0,025
	Y24	4,33 ^B ± 0,019
	Y72	4,23 ^C ± 0,019

^{A-C}: Les moyennes qui ne partagent pas la même lettre sont significativement différentes ($P \leq 0,05$).

Pour la teneur en acide lactique, un effet significatif ($P \leq 0,05$) du temps d'entreposage a été observé. L'interaction double entre la vitesse de refroidissement des yogourts leur temps d'entreposage n'était pas significatif. Le tableau 2.5 présente les valeurs d'acide lactique de tous les yogourts refroidis à 5°C aux jours 0 et 21.

Durant l'entreposage (tableau 2.5), la concentration en acide lactique de tous les yogourts ont significativement augmentés au jour 21.

Tableau 2.5 : Teneur en acide lactique des yogourts après 0 et 21 jours d'entreposage.

Temps d'entreposage (jour)	Acidité titrable (g/l)
0	8,4 ^B ± 0,16
21	10,1 ^A ± 0,16

^{A-B}: Les moyennes qui ne partagent pas la même lettre sont significativement différentes ($P \leq 0,05$).

Les dénombrements des streptocoques et des lactobacilles étaient significativement comparables ($P > 0,05$) dans tous les yogourts, quels que soient la vitesse de refroidissement employée et le temps d'entreposage. En moyenne, la population des streptocoques et des lactobacilles étaient, respectivement, de $1,03 \times 10^9$ et $9,5 \times 10^6$ UFC/mL.

2.4.2. Propriétés rhéologiques et physicochimiques

2.4.2.1. Synérèse

La vitesse de refroidissement et le temps d'entreposage n'ont eu aucun impact significatif sur la synérèse des yogourts ($P > 0,05$). En moyenne la valeur de synérèse était de $18,22 \pm 2,27\%$

2.4.2.2. Fermeté

Des effets significatifs, mais individuels de la vitesse de refroidissement (tableau 2.6) et du temps d'entreposage (tableau 2.7) ont été observés ($P \leq 0,05$).

Tableau 2.6: Impact de la vitesse de refroidissement sur les valeurs de fermeté des yogourts lors de l'entreposage.

Temps de refroidissement (heure)	Fermeté (N/m ²)
5	$503^B \pm 24$
24	$600^A \pm 24$
72	$609^A \pm 24$

^{A-B}: Les moyennes qui ne partagent pas la même lettre sont significativement différentes ($P \leq 0,05$).

Quel que soit le temps d'entreposage (tableau 2.6), la fermeté du yogourt Y5 était significativement moins élevée que celle des yogourts Y24 et Y72 comparables entre eux. La fermeté des yogourts (tableau 2.7) au jour 0 était significativement plus faible que celle des yogourts au 21^e jour.

Tableau 2.7: Valeur de fermeté des yogourts après 0 et 21 jours d'entreposage.

Temps d'entreposage (jour)	Fermeté (N/m ²)
0	522 ^B ± 11
21	619 ^A ± 11

^{A-B}: Les moyennes qui ne partagent pas la même lettre sont significativement différentes ($P \leq 0,05$).

2.4.2.3. Viscosité apparente

Une tendance significative à $P = 0,0709$ du temps d'entreposage sur la viscosité apparente a été observée (tableau 2.8). L'effet individuel de la vitesse de refroidissement n'était pas significatif.

La viscosité des yogourts avait tendance à être plus élevée au 21^e jour.

Tableau 2.8: Valeur de viscosité apparente avec un cisaillement de 10,5 s⁻¹ des yogourts après 0 et 21 jours d'entreposage.

Temps d'entreposage (jour)	Viscosité apparente (Pa*s)
0	1,6 ^B ± 0,11
21	1,8 ^A ± 0,11

^{A-B}: Les moyennes qui ne partagent pas la même lettre sont significativement différentes ($P \leq 0,05$).

2.5. Discussion

Dans ce chapitre, différentes vitesses de refroidissement ont été employées pour refroidir un yogourt brassé, avec un banc d'essai pilote. Tous les yogourts ont été produits à partir d'une seule formulation dont la composition était identique pour tous les yogourts. Le traitement thermique et l'homogénéisation utilisés étaient aussi identiques pour toutes les productions, ce qui a permis de minimiser leurs impacts sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques des yogourts.

Les résultats de ce chapitre ont démontré que quelle que soit la vitesse de refroidissement, l'abaissement de la température de 35 à 5°C a entraîné une diminution de la synérèse et une augmentation de la fermeté et de la viscosité des yogourts. Ces résultats étaient attendus, car ils représentent bien l'effet connu de la température sur ces facteurs et sont similaires à ceux obtenus par (Renan *et al.*, 2009; Penna *et al.*, 2006; Afonso & Maia, 1999; Ramaswamy & Basak, 1992; Kurmann, 1967; Roefs *et al.*, 1990; Roefs & Van Vliet, 1990) qui ont aussi observé que l'abaissement de la température de yogourts fermes ou brassés (à l'aide d'un robot culinaire ou d'une cuillère), provoquait une diminution de la synérèse et une augmentation de la fermeté et de la viscosité. Ces effets seraient dus à l'accroissement de la force des liens non-covalents (pont hydrogène et électrostatique) entre les caséines lors de l'abaissement de la température. Cela augmente conséquemment l'énergie requise pour briser le réseau (van Vliet *et al.*, 1991). Roefs et Van Vliet (1990) ont démontré que les interactions hydrophobes ayant permis de former le réseau gélifié de caséines durant la fermentation, s'affaiblissent lors du refroidissement pour être éventuellement remplacées par des liaisons hydrogène et électrostatiques. Conjointement, lorsque les interactions hydrophobes à l'intérieur du réseau de caséines sont affaiblies, cela provoquerait son relâchement (Renan *et al.*, 2009; Roefs *et al.*, 1990). Selon Mizrahi (2010), la dilatation des micelles occasionnerait une diminution de la synérèse due à la réduction de la taille des pores (espace vide où le lactosérum peut se déplacer) ce qui restreindrait aussi le mouvement du lactosérum. Le gonflement des micelles entraînerait aussi une augmentation de leur surface de contact, ce qui favoriserait la formation de ponts hydrogène entre les micelles de caséines (Lucey & Singh, 1997; Vasbinder *et al.*, 2003a).

Durant le refroidissement, l'acidification des yogourts s'est poursuivie afin d'atteindre une valeur de pH (4,47) la plus basse à 5°C. Rasic et Kurmann (1978) et Chandan et O'Rell (2013a) ont démontré que l'intensité de l'acidification dépendait de la durée du refroidissement pour atteindre une température $\leq 10^{\circ}\text{C}$ qui provoque un ralentissement de l'activité acidifiante des bactéries lactiques.

Les propriétés rhéologiques et physicochimiques des yogourts étaient différentes selon la durée du refroidissement pour abaisser la température de 20 à 5°C. Les valeurs de pH du yogourt refroidit à 5 °C en 72 heures étaient plus basses que celles des yogourts refroidis en 5 et 24 heures. Or dans ce chapitre, il a fallu respectivement 3, 2 et 33h pour

atteindre la température de 10°C pour les yogourts Y5, Y24 et Y72, ce qui pourrait expliquer la raison pour laquelle l'acidité du yogourt Y72 était la plus élevée (9,10 g/L d'acide lactique).

L'acidification durant le refroidissement produit un abaissement de pH pouvant aller au-delà du point isoélectrique des micelles de caséines (4,6). Les résultats des valeurs de pH (entre 4,55 et 4,30) dans ce chapitre sont en accord avec Martens (1972) qui a démontré que l'abaissement de la valeur de pH entre 4,5 et 4,2 durant le refroidissement (32 à 5°C) entraîne une augmentation de la fermeté d'un yogourt brassé à la main. De plus, les résultats de fermeté des yogourts Y5 et Y24 sont aussi similaires à ceux obtenus par ce même auteur qui a observé qu'à des valeurs de pH similaires (4,27 versus 4,28) un yogourt ayant subi un refroidissement lent (12 h) avait une fermeté plus élevée que le yogourt refroidi plus rapidement. Tout comme Martens (1972), les résultats de ce chapitre semblent suggérer que l'augmentation de la fermeté du yogourt n'est pas seulement fonction du développement de l'acidité, mais est aussi en fonction de la durée du refroidissement. La littérature offre peu d'information de l'effet du pH sur la synérèse d'un yogourt brassé. Kurmann (1967) a observé que l'abaissement de la valeur finale de pH entre 4,6 et 4,0 influence peu l'indice de synérèse d'un yogourt brassé à la main. Cette observation est comparable aux résultats obtenus dans ce chapitre qui semblent suggérer qu'un abaissement de la valeur de pH de 4,55 à 4,3 entre 5 et 72 h affecte peu la synérèse. Cependant, les résultats sur la synérèse semblent contredire ceux obtenus sur le yogourt ferme par Roefs et Van Vliet (1990) et Harwalkar et Kalab (1986).. Ces auteurs ont observé qu'après la fermentation, un yogourt ferme ayant une valeur de pH inférieure au point isoélectrique des micelles de caséines (4,6) avait une synérèse plus élevée. Roefs et Van Vliet (1990) ont démontré qu'un yogourt ferme ayant un pH de 4,3 après la fermentation possède une structure grossière due à la répulsion électrostatique entre les caséines du gel. Cette répulsion diminuerait la formation de liens non-covalents interprotéiques et entraînerait une augmentation de la taille des pores dans la matrice du yogourt ferme, ce qui faciliterait le déplacement du lactosérum dans le réseau et favoriserait son expulsion à l'extérieur du gel (Harwalkar & Kalab, 1986; Lucey, 2001; Puvanenthiran *et al.*, 2002). Contrairement à ces études, le yogourt produit dans ce chapitre était de type brassé et non de type ferme. Selon Kurmann (1967), un refroidissement trop rapide (temps non spécifié) peut causer une contraction du gel qui peut impliquer une expulsion du lactosérum. Par

contre, cet auteur n'indique pas la vitesse minimale requise pour engendrer une compression du réseau. Les résultats obtenus dans ce chapitre suggèrent que la contraction de la matrice due à un refroidissement trop rapide ne se produit pas avec une durée de 5 h et plus puisque le yogourt Y5 a obtenu un indice de synérèse similaire aux Y24 et Y72.

Martens (1972) a observé qu'une baisse de pH de 4,27 à 4,17 durant le refroidissement a occasionné une augmentation de la viscosité, mesurée avec un entonnoir Posthumus, d'un yogourt brassé à la main. Cet auteur a aussi démontré qu'à un pH similaire un yogourt ayant subi un refroidissement lent (12 h à 10°C suivi de 36 h à 5°C) a obtenu une viscosité similaire à un yogourt ayant reçu un refroidissement plus rapide (12 h à 5°C suivi de 36 h à 5°C). Les résultats de viscosité des yogourts Y5 et Y24 sont en accord avec les résultats obtenus par Martens (1972).

O'Rell et Chandan (2013) et Robinson et Itsaranuwat (2007) ont observé que la population des streptocoques et des lactobacilles diminue d'un log après 21 jours d'entreposage et se stabilise par la suite autour de 10^8 UFC/mL. Les résultats de dénombrement bactérien obtenus dans ce chapitre semblent contredire ceux obtenus par ces auteurs, car les comptes bactériens sont demeurés stables tout au long de l'entreposage. Il se peut que les souches bactériennes utilisées soient plus résistantes à la post-acidification, ce qui expliquerait l'absence d'une phase de déclin au 21^e jour.

Durant l'entreposage la fermeté et la viscosité des yogourts brassés ont augmenté. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Kurmann (1967), Renan *et al.* (2008b), Renan *et al.* (2008a), Renan *et al.* (2009) et Martens (1972) qui ont aussi observé que la fermeté et la viscosité des yogourts fermes et brassés augmentaient avec le temps d'entreposage. van Vliet *et al.* (1991) ont démontré que la formation de liens non-covalents entre les particules de caséines et les protéines sériques augmenterait graduellement avec la durée d'entreposage, ce qui ferait diminuer la synérèse et augmenter la viscosité du yogourt ferme. L'acidification s'est poursuivie dans tous les yogourts, durant l'entreposage de 21 jours, ce qui démontre qu'il y a eu une post-acidification. Ces résultats similaires avec ceux rapportés par Beal *et al.* (1999), Renan *et al.* (2008b), Renan *et al.* (2009), Serra *et al.* (2009), Afonso et Maia (1999), Weidendorfer *et al.* (2008) et Rasic et Kurmann (1978) qui ont démontré que la post-acidification, des yogourts produits à partir de la même souche, est dépendante de

la valeur de pH du gel au début de l'entreposage et que celle-ci se produit tout au long de l'entreposage. Selon les résultats de ce chapitre, peu importe le temps d'entreposage, les yogourts ayant subi un refroidissement lent (Y24 et Y72) ont démontré une fermeté plus élevée que le yogourt qui a reçu un refroidissement rapide (Y5). Ces résultats sont comparables avec ceux de Martens (1972) et semble suggérer que l'augmentation de la fermeté n'est pas seulement dépendante de l'acidité, mais aussi de la durée du refroidissement, car la valeur de pH du yogourt Y24 était significativement plus élevée que celle du yogourt Y72.

Tout au long de l'entreposage, les résultats sur la synérèse des yogourts ont été stables, ce qui semble contredire les données obtenues par Barrantes *et al.* (1996), Ramchandran et Shah (2009), Prasad *et al.* (2013) et Amani *et al.* (2017). Ces auteurs ont observé une diminution de la synérèse du yogourt ferme avec le temps d'entreposage. Contrairement à ces études, le yogourt produit dans ce chapitre était de type brassé et non de type ferme ce qui pourrait expliquer ces résultats contradictoires. Serra *et al.* (2009) ont observé que la synérèse d'un yogourt brassé à la cuillère ayant subi un entreposage de 21 jours augmenterait. Cependant, Weidendorfer *et al.* (2008) ont observé qu'un entreposage de 21 jours a entraîné une diminution de la synérèse d'un yogourt brassé à l'aide d'un moulin colloïdal. Ces résultats différents rapportés par ces auteurs et ceux obtenus dans ce chapitre pourraient provenir des méthodes de brassage distinctes utilisées par ces auteurs qui pourraient impliquer différents taux de cisaillement.

2.6. Conclusion

De nombreuses études ont vérifié l'effet du procédé (brassage et refroidissement) sur le yogourt brassé, mais la plupart ont été réalisées avec un brassage à la main et un refroidissement dans un réfrigérateur ou par immersion dans un bain d'eau glacée, ce qui ne représente pas des conditions normalement utilisées dans l'industrie laitière. Dans ce chapitre, un banc d'essai pilote a été utilisé pour brasser le yogourt et étudier l'effet de l'acidification produit durant différentes vitesses de refroidissement sur l'évolution des propriétés rhéologiques et physicochimiques des yogourts brassés. Les résultats ont confirmé que durant le refroidissement, les propriétés rhéologiques et physicochimiques du yogourt brassé sont dépendantes de la température. Le développement de l'acidité pendant un refroidissement de 5 et 24 h était faible, alors que celui pendant un refroidissement de 72 h était plus élevé. Cette baisse de pH a occasionné une augmentation de la fermeté. De plus, il a été démontré que la durée du refroidissement est aussi une variable significative sur la fermeté du yogourt. Ainsi avec une acidité identique, la fermeté du yogourt refroidi en 24 h était supérieure à celle du yogourt refroidi en 5 h. L'entreposage des yogourts a occasionné une augmentation de la viscosité et de la fermeté. Contrairement à un brassage fait à la main comme rapporté dans la littérature, les résultats obtenus dans ce chapitre, à partir de yogourts brassés avec un banc d'essai pilote, ont démontré que la synérèse était uniquement affectée par la température du yogourt et non par la vitesse de refroidissement ni par le temps d'entreposage. Donc, en ajustant la vitesse de refroidissement, il est possible de modifier la fermeté des yogourts brassés sans affecter la viscosité et la synérèse. Dans ce contexte, il serait intéressant d'évaluer l'impact de la présence de matière grasse sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques d'un yogourt, brassé à l'aide d'un banc d'essai pilote qui produirait un brassage plus représentatif à la réalité industrielle. La simulation des conditions industrielles impliquerait un brassage en cuve, un pompage, un lissage et un écoulement du yogourt à l'intérieur d'une tuyauterie de plusieurs mètres. De plus, le premier stade de refroidissement (40 à 20°C) des yogourts pourrait se faire en quelques minutes avec l'échangeur de chaleur, or il serait intéressant d'évaluer l'impact des vitesses de refroidissement qui sont employées pendant le deuxième stade (20 à 5°C) du refroidissement avec une chambre environnementale.

Chapitre 3: Effet de la matière grasse, de la tortuosité des conduites et de la vitesse de refroidissement sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques des yogourts brassés.

3. Résumé

Dans ce chapitre, l'impact combiné de la teneur en matière grasse, de la tortuosité d'un banc d'essai pilote servant à brasser le yogourt et de différentes vitesses de refroidissement sur le développement de l'acidité, de la fermeté, de la viscosité (mesuré avec un rhéomètre et avec l'entonnoir Posthumus) et de la synérèse des yogourts brassés a été évalué. La composition des yogourts avec (YFG) et sans gras (YSG) était respectivement standardisée à 2,6 et 0% de matière grasse, 14% de solides non gras, 3,1% de caséines (CS), 1,1% de protéines sériques (PS), avec un ratio CS/PS 2,8 et 4,2% de protéines totales. Les yogourts ont tous reçu les mêmes traitements d'homogénéisation (13,80 MPa et 3,45 MPa), thermique (94,5°C; 5 minutes), d'inoculation (1,5%) et de fermentation ($3 \pm 0,25$ h à 41°C). À pH 4,7, le yogourt a été brassé (30 rpm; 10 minutes), pompé (1,5 L/min), refroidi (20°C), lissé (425 µm) et empoté (~175 mL) à l'aide d'un banc d'essai pilote. La vitesse de refroidissement (20 à 5°C) s'est produite dans une chambre environnementale pour le refroidissement lent en 17 h (YL) et dans une chambre froide pour le refroidissement rapide en 2,5 h (YR). Pour chaque production de yogourt, l'acidité (pH et acidité titrable), la fermeté, la viscosité mesurée avec un rhéomètre et avec un entonnoir Posthumus, la synérèse et les dénombrements bactériens ont été déterminés après 1 et 21 jours d'entreposage à 5°C. L'ajout de matière grasse a fait diminuer la synérèse et augmenté la fermeté et les viscosités, sans toutefois affecter l'acidité des yogourts. La vitesse de refroidissement lente a fait augmenter l'acidité, la fermeté, les viscosités du yogourt YFG, mais à l'exception de l'acidité, les propriétés du yogourt YSG n'ont pas été affectées. Le temps d'entreposage a fait augmenter l'acidité, la fermeté, la viscosité au rhéomètre de tous les yogourts, mais la viscosité avec l'entonnoir Posthumus a seulement augmenté pour le yogourt YFG. La synérèse et les comptes microbiens n'ont pas été affectés par la vitesse de refroidissement et le temps d'entreposage. Contrairement à la littérature, la tortuosité des conduites du banc d'essai pilote n'a pas eu d'impact significatif sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques du yogourt. L'utilisation d'un banc d'essai pilote a permis de produire un brassage séquentiel de type industriel et les chambres environnementales ont permis de démontrer l'impact de la vitesse de refroidissement lente sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques des yogourts brassés avec gras.

3.1. Introduction

Au Canada, la consommation de yogourt per capita a augmenté de plus de 85% depuis les années 2000 (CSMOTA, 2013). La teneur en matière grasse d'un yogourt est généralement comprise entre 0 et 3%, mais peut atteindre 11% (Aliments Ultima, 2016). La production de yogourt implique une préparation du mélange laitier (standardisation de la composition, homogénéisation et traitement thermique), une fermentation, un brassage (yogourt brassé seulement), un refroidissement et un entreposage. La standardisation du mélange laitier permet d'ajuster la teneur en solides totaux, en protéines et en matière grasse qui influencent les propriétés rhéologiques (viscosité apparente et fermeté) et physicochimiques (synérèse) du yogourt. L'homogénéisation permet de réduire la taille des globules gras et de bien répartir les différentes poudres ajoutées au lait, alors que le traitement thermique permet de dénaturer les protéines sérielles afin qu'elles interagissent avec les caséines. Ces trois étapes permettent aux différents constituants de contribuer à la formation du réseau protéique lors de la fermentation du yogourt (Harwalkar & Kalab, 1986; Kamarides *et al.*, 2007; De Lorenzi *et al.*, 1995; Puvanenthiran *et al.*, 2002; Remeuf *et al.*, 2003; Shaker *et al.*, 2000; O'Rell & Chandan, 2013; Tamime & Marshall, 1997; Barrantes *et al.*, 1996; Lee & Lucey, 2003; Hahn *et al.*, 2012; Lee & Lucey, 2006; Cayot *et al.*, 2003; Vasbinder *et al.*, 2003a; Vasbinder & de Kruif, 2003; Vasbinder *et al.*, 2003b; Vasbinder *et al.*, 2004). L'incubation du yogourt ferme se produit dans les pots, tandis que pour le yogourt brassé l'incubation se fait en cuve. Le principe de la fermentation pour ces deux types de yogourt est le même; l'acidification du milieu par les bactéries lactiques provoque une gélification des micelles de caséines afin de former un réseau protéique grâce à la création d'interactions hydrophobes entre les micelles de caséines ou avec les protéines sérielles dénaturées (Harwalkar & Kalab, 1986; Schellhaass & Morris, 1985; Roefs *et al.*, 1990; Roefs & Van Vliet, 1990; van Vliet *et al.*, 1991). Due à la complexité de produire un brassage de type industriel à l'échelle laboratoire, la majorité des études ont focalisé sur le yogourt ferme. Pour le yogourt brassé, Afonso et Maia (1999) et Renan *et al.* (2009) ont démontré que le brassage permet la fragmentation du gel en plusieurs particules de différentes tailles en produisant un cisaillement qui brise réseau. Durant le brassage, le yogourt est pompé à travers des conduites qui peuvent impliquer une tortuosité (présence de coudes en angle de 90°) des tuyaux plus ou moins prononcée. Smith (2011) a démontré que cette tortuosité peut occasionner une perte de charge qui

se définit comme la conversion de l'énergie du pompage en friction qui provoque une déstructuration du réseau protéique du yogourt. Cependant, la grande majorité des auteurs ont étudié l'impact du brassage d'un yogourt, brassé à l'aide d'une cuillère, d'un robot culinaire ou avec un agitateur à tête perforée (Penna *et al.*, 2006; Beal *et al.*, 1999; Torres *et al.*, 2011; Hahn *et al.*, 2012; Haque *et al.*, 2001; Lee & Lucey, 2006; Remeuf *et al.*, 2003; Renan *et al.*, 2008a; Renan *et al.*, 2008b; Renan *et al.*, 2009; Serra *et al.*, 2009; Weidendorfer *et al.*, 2008). Contrairement au chapitre deux, le brassage du yogourt inclut un premier refroidissement de 40 à 20°C suivi d'un deuxième refroidissement afin d'abaisser la température à 5°C. Une température en dessous de 10°C est suggérée afin de ralentir l'acidification du yogourt provoquée par les bactéries lactiques (Rasic & Kurmann, 1978). La post acidification est souvent considérée comme indésirable, car elle peut provoquer l'apparition d'un goût trop acidulé (Tamime & Robinson, 2007a). Pour minimiser l'acidification, il est généralement conseillé d'utiliser un refroidissement en tunnel qui permet une vitesse de refroidissement rapide (Rasic & Kurmann, 1978; Robinson *et al.*, 2007). Par contre, Rasic et Kurmann (1978) ont mentionné que le refroidissement ne doit pas se faire trop rapidement (durée non spécifiée), car elle peut occasionner une augmentation de la synérèse. Kurmann (1967) et Martens (1972) ont remarqué qu'un yogourt brassé refroidi lentement obtient une acidité, une viscosité et une fermeté supérieure à celle d'un yogourt refroidi rapidement. Cependant, en laboratoire, cette étape se fait généralement par des méthodes qui ne représentent pas la réalité industrielle (refroidissement dans un réfrigérateur ou par immersion du yogourt dans l'eau froide) (Afonso & Maia, 1999; Sandoval-Castilla *et al.*, 2004; Beal *et al.*, 1999; Lee & Lucey, 2006; Remeuf *et al.*, 2003; Serra *et al.*, 2009; Haque *et al.*, 2001; Penna *et al.*, 2006; Cayot *et al.*, 2003; Hahn *et al.*, 2012; Renan *et al.*, 2008b; Schellhaass & Morris, 1985). Généralement durant l'entreposage, la fermeté et la viscosité du yogourt brassé augmentent et la synérèse diminue jusqu'au jour 21 (Renan *et al.*, 2009; Beal *et al.*, 1999; Renan *et al.*, 2008a; Renan *et al.*, 2008b; Martens, 1972; Afonso & Maia, 1999; Weidendorfer *et al.*, 2008). Cependant, Serra *et al.* (2009) ont démontré que la fermeté et la viscosité du yogourt brassé diminuent et la synérèse augmente au 14^e jour.

L'objectif de ce chapitre était de déterminer l'effet de la teneur en matière grasse de yogourts, brassés à l'aide d'un banc d'essai pilote comportant différentes tortuosités et de la vitesse de refroidissement de 20 à 5°C sur la fermeté, la synérèse et la viscosité

déterminée au rhéomètre et à l'entonnoir Posthumus. Les étapes de préparation du mélange laitier (standardisation, homogénéisation et traitement thermique) ainsi que la durée de la fermentation étaient identiques lors de la production des yogourts, ce qui a permis de minimiser leurs effets sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques du yogourt brassé.

3.2. Matériels et méthodes

3.2.1. Microorganismes

Une culture lyophilisée constituée de 95 % de *Streptococcus thermophilus* et de 5% de *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* (Yo-Dulce, Bienna, Saint-Hyacinthe, Québec, Canada) a été utilisée pour la production de yogourt brassé.

3.2.2. Ingrédients laitiers

Le mélange laitier a été préparé à partir de lait écrémé (LÉ) et de lait entier cru (LEC) (Chalifoux, Sorel-Tracy, Québec, Canada) fortifié par l'incorporation d'une poudre de lait écrémé «low heat» (PLÉ) (Agropur, St-Hyacinthe, Québec, Canada), de lactose de grade 300 (Saputo Inc., Montréal, Québec, Canada) et d'un concentré protéique de lactosérum (CPL) à 34% (Agropur, St-Hyacinthe, Québec, Canada). La composition des ingrédients laitiers est présentée au tableau 3.1. Dans ce tableau, la PLÉ, le CPL et le lactose n'ont pas d'écart types, car leur utilisation provenait du même lot.

Le LEC (80 kg) a été utilisé afin d'obtenir de la crème pour la production du yogourt avec matière grasse. Après sa réception, le LEC a été transféré dans une cuve à double paroi (Palardy Acier Inoxydable Inc., Saint-Hyacinthe, Québec, Canada) couplée à un agitateur (Batch mixer, Graitec limited, Longueuil, Québec, Canada) et chauffé à 63 °C puis écrémé à l'aide d'une centrifugeuse écrèmeuse (DeLaval Company Limited, modèle 618, Peterborough, Ontario, Canada) pour produire une crème à $52 \pm 2\%$ et un lait écrémé à $0,22 \pm 0,02\%$ de matière grasse. Une analyse de la composition du LÉ et de la crème a été réalisée par spectrométrie infrarouge FT-120 (Foss, Hillerød, Danemark). Pour éviter sa solidification, la crème a été diluée avec un litre de lait écrémé avant d'être entreposée dans une chambre froide à 5°C. Le volume restant de lait récemment écrémé a été transvasé dans une cuve à double paroi connectée à de l'eau froide ($\leq 1^\circ\text{C}$) jusqu'au lendemain matin.

Tableau 3.1: Liste d'ingrédients composant le mélange laitier.

Constituants (%)	Ingrédients ¹				
	LÉ	Crème	PLÉ	CPL	Lactose
Caséines	2,55 ± 0,0732	1,19 ± 0,119	28,9	ND	0,00
Protéines sériques	0,770 ± 0,0870	0,300 ± 0,0298	5,73	30,7	0,00
Protéines totales	3,32 ± 0,0850	1,49 ± 0,149	35,0	34,1	0,00
Solides totaux	9,35 ± 0,337	55,3 ± 3,40	97,7	97,4	99,8
Matière grasse	0,260 ± 0,0964	51,3 ± 3,37	0,680	1,44	0,00

¹LÉ, Lait écrémé; PLÉ, Poudre de lait écrémé; CPL, Concentré protéique de lactosérum

3.2.3. Préparation du ferment

Le ferment a été élaboré avec un lait reconstitué qui a été produit à partir de 120 grammes de poudre de lait écrémé par litre, stérilisé (110°C pendant 6 minutes) puis immergé dans un bain d'eau glacée pour ajuster la température à 41°C. À cette température, le lait reconstitué a été inoculé à un taux de 0,1% (p/p) avec la culture Yo-Dulce et incubé à 41°C dans un incubateur (Isotemp incubator modèle 225D, Fisher, Hampton, New Hampshire, États-Unis) jusqu'à l'atteinte d'une valeur de pH de 4,7 (4,5 ± 0,5 h). Ensuite, le ferment a été réfrigéré à 5°C pendant 16 heures avant la production de yogourt brassé.

3.2.4. Préparation du mélange laitier

Chaque jour de production, le type de yogourt a été choisi aléatoirement. Dans le cas du yogourt sans gras (YSG), deux cuves de 30 kg ont été produites à partir d'un mélange laitier et chaque cuve représentait une production. Le mélange laitier a été standardisé à une teneur en protéines totales de 4,2%, en caséines (CS) de 3,1%, en protéines sériques (PS) de 1,1%, avec un ratio CS/PS de 2,8, en matière grasse de 0%, en solides non gras (SNG) et en solides totaux à 14%. Dans le cas du yogourt faible en gras (YFG), deux productions de yogourt (une par cuve) de 30 kg ont été produites à partir d'un mélange laitier dont les teneurs en SNG, protéines totales, CS, PS et leur

ratio CS/PS étaient identique à celles du yogourt YSG, tandis que la teneur en matière grasse (2,6%) et en solides totaux (16,6%) étaient différentes. Lors de la réception du LÉ, une analyse de composition a été effectuée avec l'appareil à infra-rouge FT-120 et les résultats ont permis de déterminer la quantité des différents ingrédients laitiers à ajouter pour obtenir 90 kg de mélange laitier avec la composition cible désirée (tableau 3.2).

Tableau 3.2 : Quantité (kg) d'ingrédients utilisée pour la formulation du mélange laitier.

Ingrédients	YSG	YFG
Lait écrémé	$79,9 \pm 0,336$	$80,3 \pm 0,295$
Crème	0	$3,47 \pm 1,38$
Poudre de lait écrémé	$2,14 \pm 0,371$	$2,11 \pm 0,0681$
Concentré protéique de lactosérum	$0,968 \pm 0,143$	$0,898 \pm 0,0655$
Lactose	$2,22 \pm 0,341$	$2,22 \pm 0,554$
Ferment	$1,54 \pm 0,0500$	$1,59 \pm 0,0897$

YSG, Yogourt sans gras; YFG, yogourt faible en gras

3.2.5. Configurations du banc d'essai pilote

Un banc d'essai pilote (BEP) a été employé pour simuler des conditions industrielles d'une production de yogourt brassé. La figure 3.1 présente une configuration linéaire (a) et tortueuse (b) qui a été utilisée avec le BEP afin de déterminer l'impact de la présence de coudes en angle de 90° sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques du yogourt brassé. Le BEP est constitué d'une cuve à déversoir conique couplé à un agitateur à pales hélicoïdales, inspiré de Tamime et Robinson (1999a), ayant des chicanes (47 X 2,5 cm) amovibles à angle de 45° dans le sens du brassage. Ce mélangeur était connecté à un moteur (GPP233111 Baldor industrial, Arkansas, É-U) couplé d'un variateur de vitesse (NEMA-4x/IP65 Penta KB Power, Floride, É-U). Une pompe à engrenage (modèle 018, Universal Lobe Pump, Waukesha, Wisconsin, É-U) connectée à un variateur de vitesse (Bronco 210 Kollmorgen, Virginie, É-U) était positionnée après la cuve. Un manomètre (Qualtech distribution, Québec, Québec,

Canada) et un thermocouple (T1) étaient utilisés pour surveiller la pression et la température du yogourt avant le refroidissement. Après la pompe, une buse de pré lissage conique (taille du grillage : 1,4 mm) était située avant l'échangeur de chaleur de type tubulaire (3.4 X 431.8 cm) (PG7757/84 Sepak Industries pty ltd, Sydney, Australie). Un deuxième thermocouple (T2) a été employé pour vérifier la température du yogourt refroidi. Après l'échangeur de chaleur, une buse de lissage de 425 µm a été installée avant le branchement d'un tuyau linéaire (figures 3.1 et 3.3) ou constitué de 18 coudes à angle de 90° (figures 3.1 et 3.4) d'un diamètre de 3,81 cm et d'une longueur de 4,4 m. À l'extrémité terminale de la tuyauterie, un troisième thermocouple (T3) était installé pour vérifier la température lors de l'empotage. Les conduites de 4,4 m étaient positionnées à un angle d'élévation de 6° pour s'assurer un remplissage des tuyaux durant le pompage du yogourt. Les thermocouples étaient connectés à un enregistreur de température portable (enregistreur OM-Daqpro-5300 avec thermocouple de type K, Omega Engineering, Stamford, Connecticut, É-U). Les deux configurations du BEP se distinguaient entre elles à partir de la conduite de 4,4 m, car les étapes du brassage en cuve, du pompage et du refroidissement avec l'échangeur de chaleur étaient toutes identiques (figure 3.2).

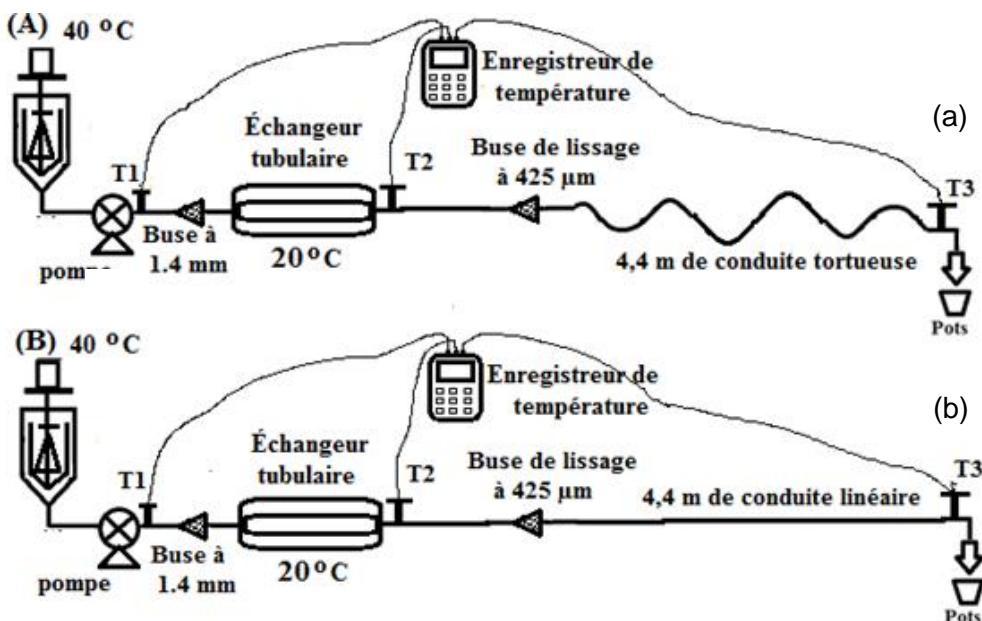


Figure 3.1: Schéma du banc d'essai pilot (BEP) avec une configuration linéaire (a) ou tortueuse (b).



Figure 3.2: Section commune des configurations du BEP: (1) Cuve, (2) Pompe, (3) Thermocouple T1, (4) buse de 1.4 mm, (5) Échangeur de chaleur tubulaire, (6) mélangeur à pales hélicoïdales.



Figure 3.3: Section du BEP comportant la configuration linéaire: (1) Échangeur de chaleur tubulaire, (2) Thermocouple T2, (3) Buse de lissage de 425 μm , (4) Thermocouple T3, (5) Valve d'échantillonnage.



Figure 3.4: Section du BEP comportant la configuration tortueuse: (1) Échangeur de chaleur tubulaire, (2) Thermocouple T2, (3) Buse de lissage de 425 μm , (4) Coude en angle de 90°, (5) Thermocouple T3, (6) Valve d'échantillonnage.

3.2.6. Équipements pour le refroidissement

Deux chambres environnementales (RTH-16P-2, Burnsco, Kanata, Ontario, Canada) (modèle 6030, Caron Products & Services, Inc., Marietta, Ohio, É-U) et une chambre froide (310 X 240 cm) (Bally engineered structures Inc., Bally, Pennsylvanie, É-U) ont été employées pour comparer l'impact de la vitesse de refroidissement. Les chambres environnementales ont été utilisées pour recréer une vitesse de refroidissement lente alors que la vitesse de refroidissement rapide a été produite par la chambre froide. Durant le refroidissement, la température ambiante autour des pots et celle à l'intérieur des pots de yogourt ont été enregistrées à l'aide d'un enregistreur de température portable (enregistreur OM-Daqpro-5300 avec thermocouple de type K, Omega Engineering, Stamford, Connecticut, É-U). Les trois pots de yogourt utilisés pour l'enregistrement de la température étaient munis d'un thermocouple de type T fixé au couvercle. Il y a avait à l'intérieur de ces pots une gélose d'agar supplémentée d'azoture de sodium, ce qui a permis de les réutiliser pour le refroidissement de plusieurs productions de yogourt. Des tests préliminaires ont été effectués pour s'assurer que les deux chambres environnementales produisaient des vitesses de refroidissement comparables. De plus, d'autres tests préliminaires ont démontré que le temps de refroidissement d'un pot contenant une gélose d'agar était identique à celui d'un pot contenant du yogourt brassé. Avant la production de yogourts, les 3 pots de gélose étaient conservés à 20°C dans un petit incubateur (modèle 3724, Fisher scientific, Hampton, New Hampshire, États-Unis) pour s'assurer que la température des géloses soit identique à celle des yogourts qui ont été empotés à 20°C.

Les vitesses de refroidissement employées sont présentées dans la figure 3.5. La vitesse de refroidissement lente (YL) correspondait à un abaissement de la température de 20 à 5°C en 17 heures à l'aide d'une des deux chambres environnementales. Ce refroidissement lent représente une condition pouvant être utilisée dans le milieu industriel. Dans le chapitre deux, il a été démontré que la synérèse et la viscosité apparente d'un yogourt ayant subi une vitesse de refroidissement rapide de 5 h n'étaient pas significativement différentes d'un yogourt ayant été refroidi en 24 h. Donc, pour des raisons de commodité, une vitesse de refroidissement de 17 heures a été choisie puisqu'elle permettait d'analyser les yogourts au lendemain matin de la production. La vitesse de refroidissement rapide (YR)

correspondait un abaissement de la température de 20 à 5°C en 2,5 heures à l'aide d'une chambre froide conventionnelle pouvant être retrouvée dans le milieu industriel.

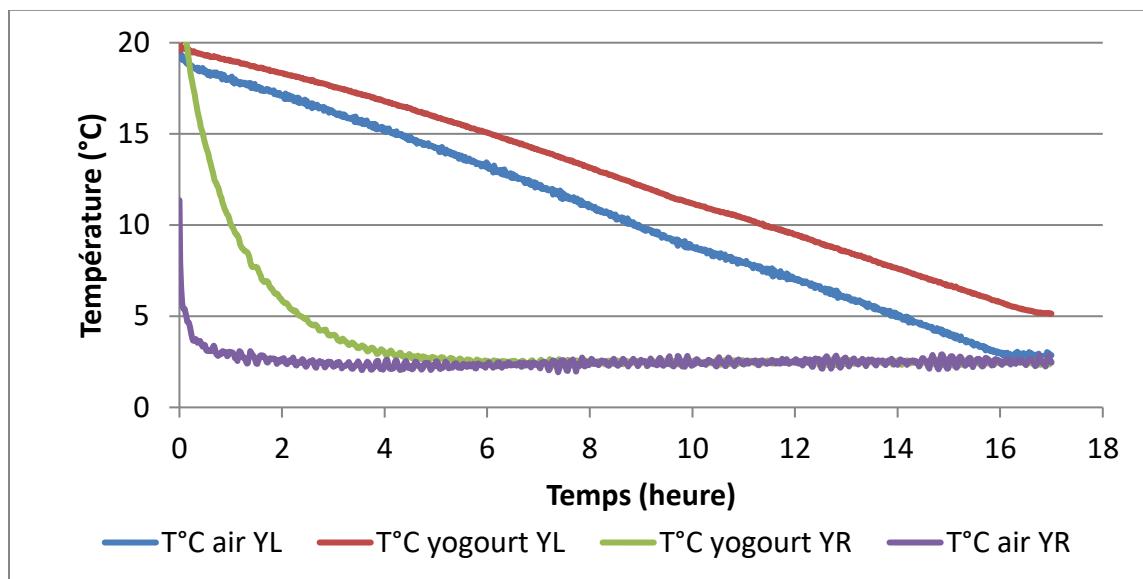


Figure 3.5: Refroidissement des pots de yogourt (175 mL) avec une vitesse de refroidissement rapide (YR) dans une chambre froide et lente (YL) dans une chambre environnementale.

3.2.7. Production de yogourt

Huit différents yogourts brassés ont été produits en combinant deux formulations de mélange laitier (YSG; 0% de matière grasse ou YFG; 2,6% de matière grasse) associés avec deux configurations du BEP (linéaire ou tortueuse) et impliquant deux vitesses de refroidissement (YR ou YL). Une fois le mélange laitier produit, la configuration du BEP et la vitesse de refroidissement ont été choisies aléatoirement pour chaque cuve de yogourt à produire. Une journée de production impliquant deux productions de 30 kg du même mélange laitier a été établie par semaine.

Lors de la journée de production, les ingrédients laitiers en poudre ont été pesés et ajoutés au LÉ dans une cuve puis mélangé 15 minutes à 4°C par recirculation à l'aide d'une pompe centrifuge (modèle FM-O/115, Alfa-Laval, Lund, Suède). Pour la production du mélange YFG, la crème a été ajoutée et un brassage supplémentaire de cinq minutes a été effectué. Par la suite, le mélange YSG ou YFG a été homogénéisé (SHL 25A, Alfa-Laval, Lund, Suède) à deux pressions (13,80 MPa et 3,45 MPa) à 60°C puis a reçu un traitement thermique de 94,5°C pendant cinq minutes avant d'être refroidi

à 41 ± 1°C (pasteurisateur HTST : C3-SR, Alfa-Laval, Lund, Suède). Une fois pasteurisé, le mélange laitier a été transféré dans deux cuves à déversoir conique de 30 kg et un échantillon par cuve a été prélevé pour vérifier la composition des mélanges à l'aide du système FT-120. Les cuves ont été placées dans un incubateur à yogourt réglé à 41°C puis inoculés (un décalage d'une heure entre les deux cuves) à un taux de 1,5% (p/p) avec le ferment actif qui a été produit la journée précédente (section 3.1.1).

L'évolution du pH dans les deux cuves a été suivie aux heures. Pour chaque cuve l'incubation a été arrêtée lorsque la valeur de pH du yogourt a atteint 4,70 ± 0,01, ce qui a nécessité une durée de 3,0 ± 0,25 h. Subséquemment, la cuve a été connectée au BEP afin de subir un brassage en cuve avec un mélangeur à pales hélicoïdales réglé à une vitesse de 30 rpm pendant 10 minutes. Pour accentuer le brassage en cuve, les 30 premières secondes de l'opération impliquaient l'utilisation des chicanes fixées au mélangeur. Après 10 minutes, la vitesse du mélangeur a été réduite à 15 rpm et le yogourt a été pompé à un débit moyen de 1,5 L/min créant une pression qui variait entre 10,34 et 27,60 kpa. Durant le pompage, le yogourt a été refroidi (20°C), lissé, pompé à travers la configuration linéaire ou tortueuse du banc d'essai et empoté par la valve d'échantillonnage dans des pots de yogourt de 175 ml (Plastipak, GenPak, Boucherville, Québec, Canada). Selon la vitesse de refroidissement impliquée, les pots de yogourt ont été placés dans la chambre froide ou dans l'une des deux chambres environnementales (choix aléatoire). Une fois le refroidissement complété, tous les pots de yogourt ont été entreposés dans la même chambre froide à 5°C pendant 21 jours. Des pots de yogourt ont été prélevés aléatoirement après 1 et 21 jours pour effectuer les différentes analyses rhéologiques, la synérèse et le dénombrement microbien.

3.2.8. Analyses

3.2.8.1. Composition des ingrédients et des yogourts brassés

Afin de confirmer la composition des yogourts, la teneur en protéines totales, en matière grasse et en solides totaux a, respectivement, été analysée en duplicita par les méthodes officielles du Kjeldhal (International Dairy Federation, 2016)), du Mojonnier (International Dairy Federation, 2006)) et du four sous vide (Association of Official Analytical Chemists (AOAC), 2000). L'analyse du Kjeldhal, pour la teneur en protéines

totales, a été effectuée par la détermination de la teneur en azote. Un facteur de conversion de 6,38 a été utilisé pour obtenir la teneur en protéines.

3.2.8.2. pH et acidité titrable

Durant l'incubation des yogourts, les mesures de pH ont été réalisées à l'aide d'un pH-mètre portatif Hanna Instruments (modèle HI 99161, Québec, Canada). Lors de l'entreposage, les mesures du pH ont été effectuées à partir de 10 g de yogourt avec un titrateur automatique (DL-15, Mettler-Toledo SAS, Anachemia/VWR, Canada). L'acidité titrable a été analysée après la mesure de pH en ajoutant 10 g d'eau distillée avant de commencer la titration avec du NaOH N/9 (AccuSPEC, Hawthorne, Pennsylvanie, É-U) jusqu'à l'obtention d'une valeur de pH de 8,6. Le résultat a été exprimé en d'acide lactique (g/L). Les mesures du pH et de l'acidité titrable ont été réalisées en duplicita avec les méthodes officielles (Association of Official Analytical Chemists (AOAC), 2000; International Dairy Federation, 1991)).

3.2.8.3. Viscosité apparente

3.2.8.3.1. Rhéomètre

La viscosité apparente a été mesurée à l'aide d'un système de cylindre coaxial DIN ayant un diamètre de 28,924 mm (modèle CC-27) adapté au rhéomètre (Physica MCR 301, Anton Paar, Graz, Autriche). Les analyses ont été conduites à 5°C grâce au système de contrôle thermique Peltier (modèle CC27/T200/SS, Anton Paar, Graz, Autriche). Pour éviter la destruction non nécessaire du gel, 21,22 g de yogourt ont été prélevés et transférés dans le cylindre coaxial à l'aide d'un échantillonneur à yogourt de forme cylindrique spécialement conçu à cet effet (Gentès *et al.* (2011)). Un temps d'attente de cinq minutes a été établi avant d'appliquer un taux de cisaillement graduel de 0 à 100 s⁻¹ en 10 minutes. Simultanément, la contrainte de cisaillement était mesurée à chaque élévation de taux de cisaillement. La viscosité apparente a été calculée avec un taux de cisaillement de 10,5 s⁻¹ avec l'équation suivante :

$$\text{Viscosité apparente (Pa * s)} = \frac{K * 10,5^{(n)}}{10,5} \quad (1)$$

K = Coefficient de consistance (Pa.s) N = indice de comportement d'écoulement

10.5 = Vitesse de cisaillement (s^{-1})

3.2.8.3.2. Entonnoir Posthumus

Plusieurs auteurs ont utilisé l'entonnoir Posthumus pour mesurer la viscosité apparente (Steenbergen, 1971a; Steenbergen, 1971b; Steenbergen, 1971c; Galesloot, 1958; Beal *et al.*, 1999; Torres *et al.*, 2011; Martens, 1972; Becker & Puhan, 1989). Dans cette étude, les résultats de viscosité avec l'entonnoir Posthumus ont été comparés avec ceux du rhéomètre afin de vérifier si ces deux méthodes d'analyse présentent les mêmes tendances. Le modèle de l'entonnoir Posthumus qui a été utilisé dans ce chapitre est le même que celui de Kutter *et al.* (2011) dans lequel le yogourt s'écoule à travers un orifice de 8 mm. Avant l'analyse, 300 g de yogourt a été transféré dans l'entonnoir Posthumus qui était placé dans un réfrigérateur à 5°C (Chromatography Refrigerator, VWR, Montréal, Québec, Canada). L'orifice de l'entonnoir était bouché avec un film plastique pour empêcher l'écoulement du yogourt avant que l'analyse soit prête. Sous l'entonnoir, il y avait une balance (modèle P-2002 série Pinnacle, Denver Instrument, Mississauga, Ontario, Canada) connectée à un système d'acquisition de données. Au départ de l'analyse, le film de plastique a été retiré et l'enregistrement sur le temps requis pour l'écoulement du yogourt a commencé. Basée sur la dynamique du procédé, l'analyse s'est terminée lorsque 86% de la masse du yogourt s'est écoulée (259 g).

3.2.8.4. Fermeté

La fermeté a été mesurée à 5°C avec 5 échantillons de yogourts avec un texturomètre TA-XT2 (Texture Technology Corp., Scarsdale, New-York, É-U). La fermeté a été définie par le pic de force maximale, en Newton (N), après une pénétration de 10 mm de yogourt par une sonde cylindrique (Hassan *et al.*, 1996). La sonde employée était reliée à une cellule de charge de 5 kg et avait un diamètre de 25 mm. Le

texturomètre était programmé pour produire une vitesse de pénétration de 1 mm/s (Hess et al., 1997). La fermeté (N/m^2) a été calculée par l'équation suivante :

$$\text{Fermeté } \left(\frac{N}{m^2} \right) = \frac{\text{Force maximale obtenue (N)}}{\text{Surface de contact de la sonde } (4,91 \times 10^{-4} m^2)} \quad (2)$$

3.2.8.5. Synérèse

La synérèse a été déterminée en duplicita par centrifugation (Bullard (2011). À l'aide d'un échantillonneur à yogourt de forme cylindrique, un échantillon de yogourt de 25 g a été transféré dans un tube Falcon à fond conique de 50 mL (Fisher Brand, Life Technologies Inc., Burlington, Ontario). Subséquemment, le tube a été centrifugé à 1000 rpm (185 g) pendant 20 minutes à 5°C (centrifugeuse Beckman Coulter; modèle Avanti J-26 XPI, godet JS-7,5 conique; Mississauga, Ontario, Canada). Le résultat a été calculé avec l'équation suivante :

$$\% \text{ synérèse} = \frac{\text{Poids de lactosérum recueilli (g)}}{\text{Poids de yogourt (g)}} \times 100 \quad (3)$$

3.2.8.6. Compte bactérien

Les comptes bactériens ont été effectués selon la méthode officielle (International Dairy Federation, 1997)). Le dénombrement de *Streptococcus thermophilus* a été réalisé avec le bouillon M17 (Difco™ no 218561, Le pont de Claix, France) supplémenté d'Agar et de lactose (Difco™ no 215620, Le pont de Claix, France). *Lactobacillus delbruckii* subsp. *bulgaricus* a été dénombré dans un milieu MRS (Difco™ Lactobacilli no 288130, Le pont de Claix, France) additionné d'agar et d'acide lactique glacial (Fisher Scientific Nepean, Ontario, Canada) pour obtenir un pH de 5,5. L'eau peptonée a été produite à partir d'eau distillée, de peptone (Bacto™ no 211677) à 0,1% (p/v) et d'une quinzaine de billes de verre de 4 mm, et elles ont été stérilisées à 121°C pendant 15 minutes. Alors que la stérilisation des milieux de croissance était de 10 minutes avant qu'ils soient placés dans un bain thermostatique à 45°C. Les échantillons de yogourt ont été dilués dans des bouteilles d'eau peptonée de 99 mL suivis de 40 agitations verticales pour assurer la destruction des chaînes bactériennes (St-Gelais & Haché, 2006). Les boîtes de Pétri (Sarstedt Inc., Montréal, Québec, Canada) ont été inoculées dans la masse et incubées dans une hotte anaérobie

(modèle 1025, Forma Scientific, Waltham, Massachusetts, É-U) à 37°C pendant 48 heures. Le dénombrement des Pétri ayant un compte bactérien entre 30 et 300 colonies a été converti en unité formatrice de colonies par millilitre (UFC/ml).

3.2.8.7. Analyse statistique

Un dispositif expérimental avec un plan en sous-tiroir (split plot) a été utilisé pour déterminer les impacts de la teneur en matière grasse, de la configuration du banc d'essai pilote, de la vitesse de refroidissement et de l'entreposage sur l'évolution du pH, de la production d'acide lactique, de la synérèse, de la fermeté, de la viscosité au rhéomètre et avec l'entonnoir Posthumus et sur le dénombrement bactérien des yogourts. La parcelle principale est composée de la concentration en matière grasse (bloc) puis de la configuration du banc d'essai pilote et la vitesse de refroidissement (factoriel 2 x 2). L'analyse durant l'entreposage est en sous-parcelle. Trois répétitions ont été réalisées.

L'analyse de variance a été analysée avec la procédure GLM (general linear model) à l'aide du logiciel SAS (Version 2.0.4, 2003; SAS Institute Inc., SAS Campus Drive, Cary, Caroline du Nord, É-U) en utilisant une valeur de $P \leq 0,05$.

3.3. Résultats

3.4.1. Composition des yogourts

Les valeurs cibles de solides totaux, protéines totales et de matière grasse des yogourts YSG ont respectivement été atteintes; $13,87 \pm 0,62$, $4,09 \pm 0,38$ et $0,23 \pm 0,14\%$ alors que celles des yogourts YFG étaient de $16,20 \pm 0,20$, $3,92 \pm 0,44$ et $2,46 \pm 0,092\%$.

3.4.2. Dénombrement bactérien

Le type de yogourt, la configuration du BEP, la vitesse de refroidissement et le temps d'entreposage n'ont pas donné eu d'impact significatif ($P > 0,05$) sur les comptes bactériens. En moyenne, la population des streptocoques et des lactobacilles étaient, respectivement, de $2,77 \times 10^8$ et de $9,58 \times 10^7$ UFC/mL.

3.4.3. Propriétés rhéologiques et physicochimiques

3.4.3.1. Synthèse

Un effet individuel significatif du type de yogourt (figure 3.6) a été observé sur l'indice de synthèse ($P \leq 0,05$). Indépendamment de la vitesse de refroidissement et du temps d'entreposage, l'indice de synthèse des yogourts YSG était significativement plus élevé que celle des yogourts YFG (figure 3.6).

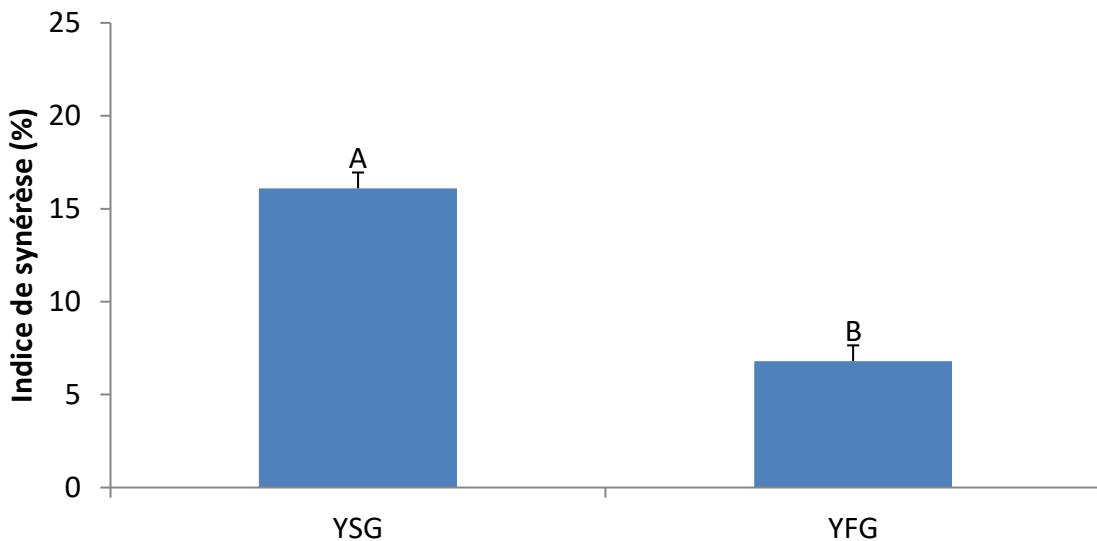


Figure 3.6 : Indice de synergie des yogourts à 0% (YSG) et à 2,6% (YFG) de matière grasse, durant leur entreposage.

^{A-B}: Les moyennes qui ne partagent pas la même lettre sont significativement différentes ($P \leq 0,05$).

3.4.3.2. Fermeté et viscosité

Les figures 3.7 et 3.8 présentent les valeurs de fermeté et de viscosité au rhéomètre obtenues selon le type de yogourt. Un effet individuel significatif du type de yogourt a été observé sur la fermeté et la viscosité ($P \leq 0,05$). De plus, un effet individuel significatif ($P \leq 0,05$) du temps d'entreposage a aussi été observé.

Une interaction double significative ($P \leq 0,05$) entre le type de yogourt et la vitesse de refroidissement a été observée pour la viscosité avec l'entonnoir Posthumus. La figure 3.9 présente les valeurs de viscosité avec l'entonnoir Posthumus obtenues selon le type de yogourt refroidi à différentes vitesses.

Peu importe la vitesse de refroidissement utilisée et la durée d'entreposage, la fermeté (figure 3.7) et la viscosité au rhéomètre (figure 3.8) des yogourts YSG étaient significativement plus faibles que celles du yogourt YFG. La viscosité avec l'entonnoir Posthumus (figure 3.9) des yogourts YSG étaient significativement plus faibles que celles du yogourt YFG autant pour les yogourts refroidis rapidement (YR) que refroidis lentement (YL). Cependant, en présence de matière grasse (YFG) la fermeté et la

viscosité au rhéomètre et avec l'entonnoir Posthumus étaient plus élevées en utilisant une vitesse de refroidissement lente (YL) que rapide (YR).

La figure 3.10 présente les valeurs de viscosité avec l'entonnoir Posthumus obtenues selon le type de yogourt durant l'entreposage. Une interaction double significative ($P \leq 0,05$) a été observée entre le type de yogourt et le temps d'entreposage sur la viscosité avec l'entonnoir Posthumus du yogourt brassé. La viscosité avec l'entonnoir Posthumus (figure 3.10) du yogourt YFG au jour 21 était le plus élevée suivie du yogourt YFG au jour 1. Par contre, pour les yogourts sans gras (YSG), le temps d'entreposage n'a pas développé d'effet significatif et leurs valeurs étaient les plus basses. Les figures 3.11 et 3.12 présentent les valeurs de fermeté et de viscosité au rhéomètre des yogourts obtenus durant l'entreposage. La fermeté et la viscosité au rhéomètre des yogourts au jour 1 étaient significativement plus basses qu'au jour 21.

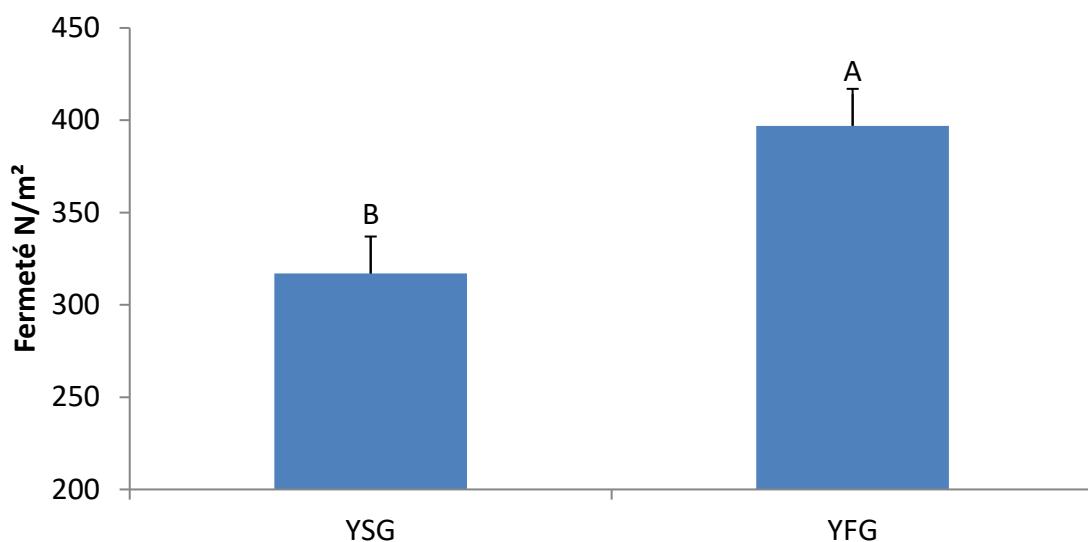


Figure 3.7 : Fermeté des yogourts à 0% (YSG) et à 2,6% (YFG) de matière grasse, durant leur entreposage.

^{A-B}: Les moyennes qui ne partagent pas la même lettre sont significativement différentes ($P \leq 0,05$).

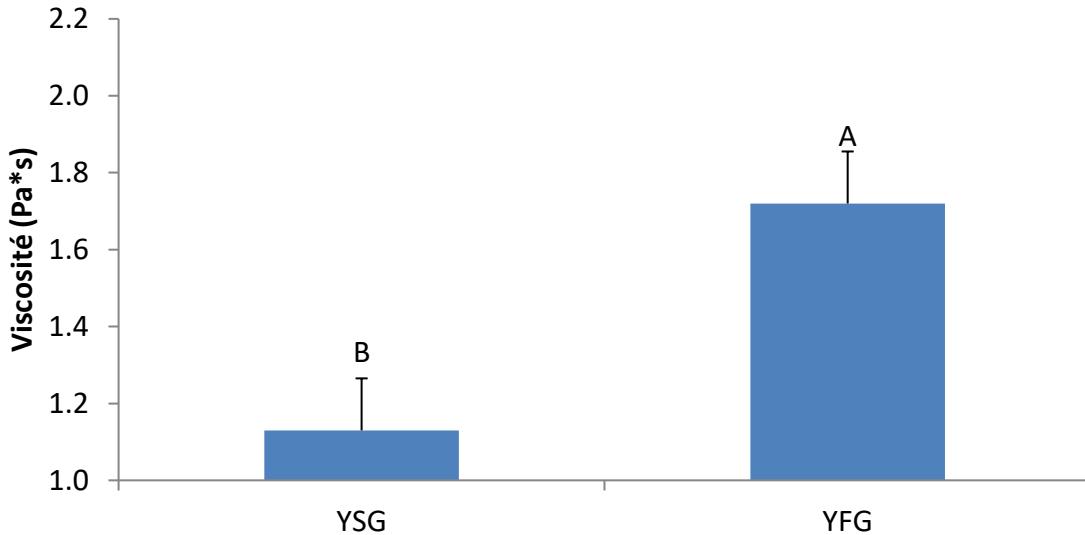


Figure 3.8 : Viscosité au rhéomètre des yogourts à 0% (YSG) et à 2,6% (YFG) de matière grasse, durant leur entreposage.

^{A-B}: Les moyennes qui ne partagent pas la même lettre sont significativement différentes ($P \leq 0,05$).

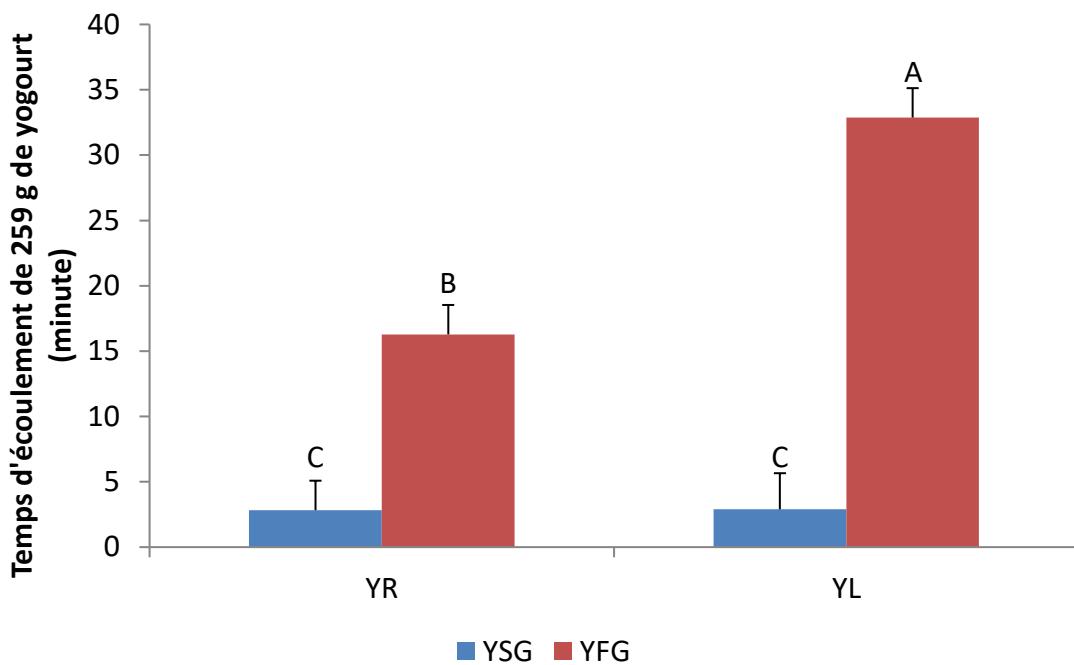


Figure 3.9 : Valeur du temps d'écoulement à l'entonnoir Posthumus des yogourts à 0% (YSG) et à 2,6% (YFG) de matière grasse, durant leur entreposage, ayant subi une vitesse de refroidissement rapide (YR) et une vitesse de refroidissement lente (YL).

^{A-C}: Les moyennes qui ne partagent pas la même lettre sont significativement différentes ($P \leq 0,05$).

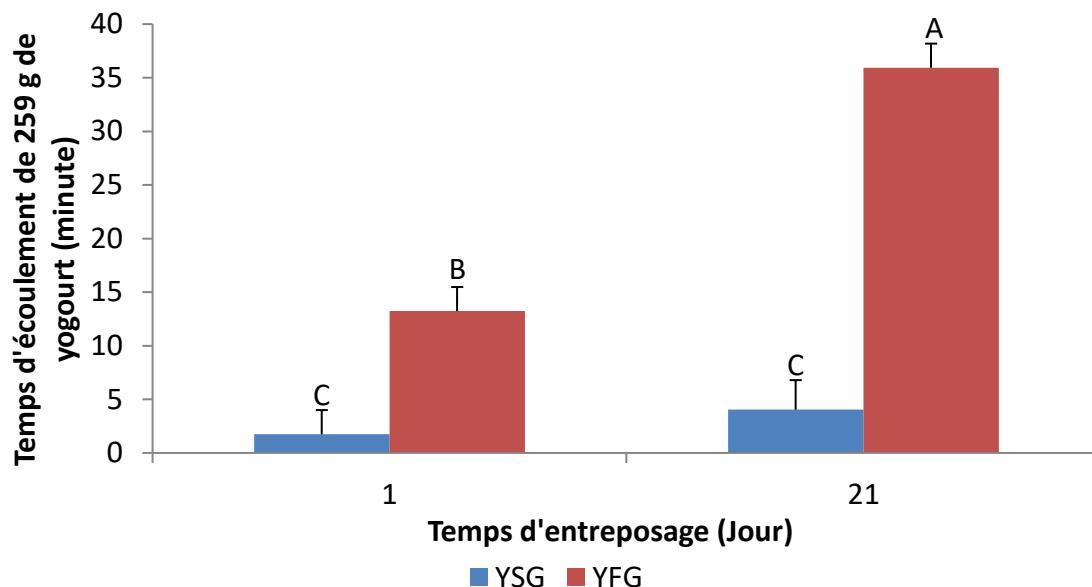


Figure 3.10 : Valeur du temps d'écoulement à l'entonnoir Posthumus des yogourts à 0% (YSG) et à 2,6% (YFG) de matière grasse après 1 et 21 jours d'entreposage.

^{A-C}: Les moyennes qui ne partagent pas la même lettre sont significativement différentes ($P \leq 0,05$).

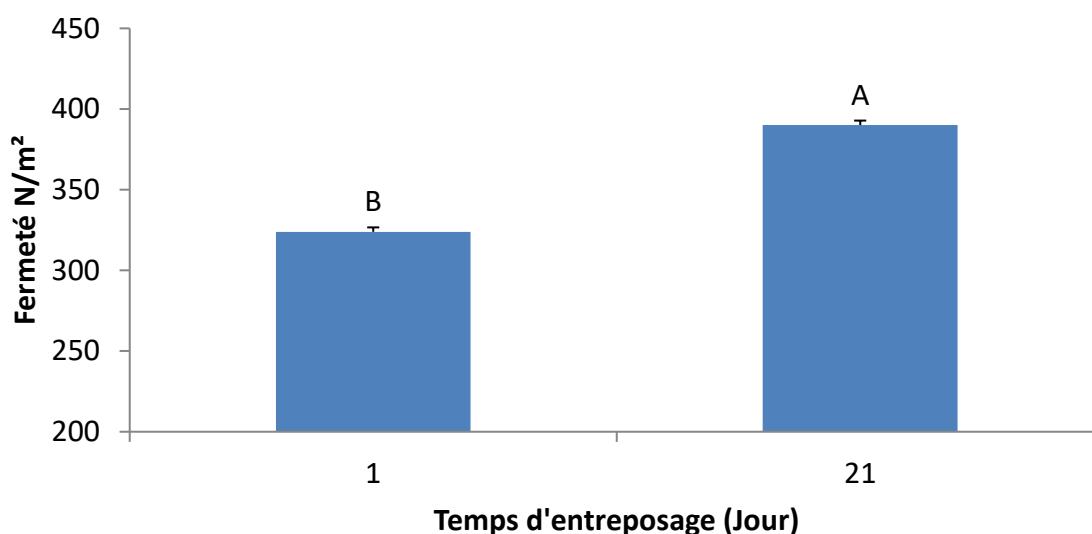


Figure 3.11 : Valeur de fermeté des yogourts après 1 et 21 jours d'entreposage

^{A-B}: Les moyennes qui ne partagent pas la même lettre sont significativement différentes ($P \leq 0,05$).

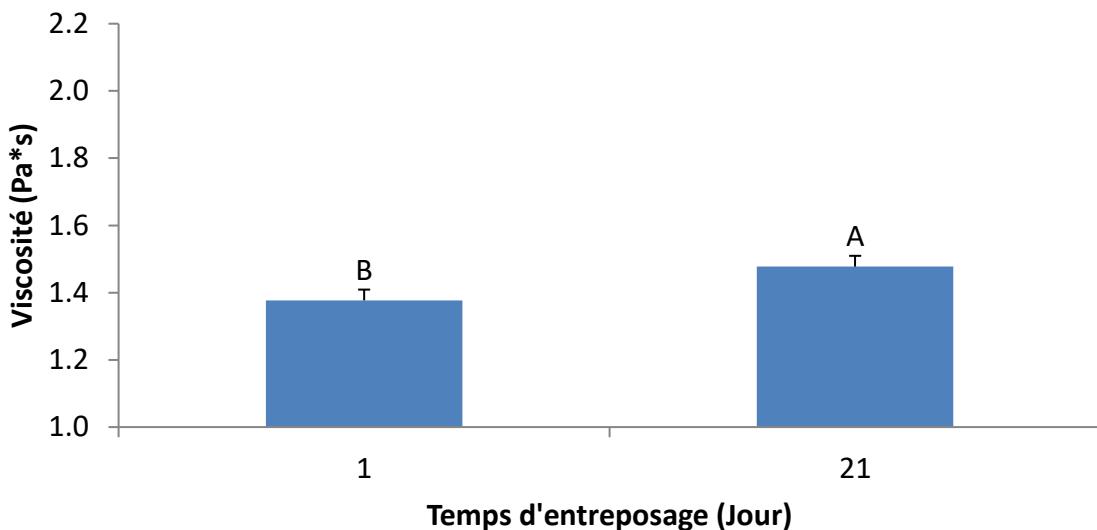


Figure 3.12 : Valeur de la viscosité au rhéomètre des yogourts après 1 et 21 jours d'entreposage.

^{A-B}: Les moyennes qui ne partagent pas la même lettre sont significativement différentes ($P \leq 0,05$).

Par contre, aucun effet significatif ($P > 0,05$) de la configuration du BEP (linéaire ou tortueux) n'a été observé sur les analyses effectuées avec les différents yogourts. Cependant, les résultats tendent à démontrer que le yogourt qui a passé à travers la configuration tortueuse du BEP a obtenu une synergie inférieure (10,8%) et une viscosité supérieure avec l'entonnoir Posthumus (15 min) comparativement au yogourt qui s'est écoulé dans la configuration linéaire (12,1% et 12,5 min).

3.4. Discussion

Dans ce chapitre, deux formulations de yogourt ont été élaborées pour produire un yogourt à 0 (YSG) et à 2,6% (YFG) de matière grasse, brassés à l'aide d'un banc d'essai pilote comportant deux configurations dont une tuyauterie linéaire et l'autre tortueuse, refroidis avec une vitesse de refroidissement rapide en 2,5 h (YR) ou lente en 17 h (YL) et entreposés durant 21 jours. Pour les deux mélanges laitiers, les paramètres du traitement thermique et de l'homogénéisation, ainsi que le temps de fermentation

étaient identiques pour toutes les productions, afin de minimiser leurs impacts sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques des yogourts.

Les yogourts YSG et YFG avaient une teneur en protéines et en SNG identiques, mais leur teneur en solides totaux était différente due à la présence ou l'absence de matière grasse dans les formulations. Le yogourt YFG a obtenu une fermeté et une viscosité au rhéomètre et avec l'entonnoir Posthumus plus élevées ainsi qu'une synérèse plus faible que le yogourt YSG. Les résultats de ce chapitre sont en accord avec ceux de la littérature qui ont aussi démontré que l'augmentation de la teneur en matière grasse entraîne une diminution de la synérèse et une augmentation de la fermeté et de la viscosité mesurée au rhéomètre et avec l'entonnoir Posthumus (Abu-Jdayil *et al.*, 2013; Shaker *et al.*, 2000; Kaminarides *et al.*, 2007; De Lorenzi *et al.*, 1995; Martens, 1972; Lussier, 2017). Ces résultats pourraient être dus à la participation des globules gras homogénéisés dans la formation de la matrice protéique lors de la fermentation. La présence de la matière grasse pourrait augmenter le nombre d'interactions hydrophobes supplémentaires dans le réseau, qui se traduirait par une augmentation de la résistance au cisaillement et une diminution de la taille des pores (espace vide où le lactosérum peut se déplacer) qui limitent le mouvement du lactosérum (Barrantes *et al.*, 1996). Krzeminski *et al.* (2011) et De Lorenzi *et al.* (1995) ont démontré que l'ajout de matière grasse permet au yogourt d'avoir une meilleure résistance au cisaillement, car les liens entre les globules gras homogénéisés et les protéines sont les premiers à être rompus avant que le cisaillement brise le réseau de caséines. Or la contribution de la matière grasse permet de renforcer le réseau protéique en augmentant l'élasticité de la matrice tridimensionnelle, ce qui permet de mieux résister au brassage.

Au niveau de l'acidité, les valeurs de pH (4,24) et la teneur en acide lactique (77 g/L) entre les yogourts YSG et YFG étaient identiques, puisque les comptes bactériens entre les yogourts et leur temps de fermentation étaient similaires. Les résultats de ce chapitre sont en accord avec Kaminarides *et al.* (2007) qui ont démontré que l'acidité d'un yogourt à 0,9% de matière grasse était similaire à celle d'un yogourt à 2,3% de matière grasse.

La tortuosité des conduites n'a pas eu d'effet significatif sur l'indice de synérèse, la fermeté et les viscosités. Steenbergen (1971c) (cité par, Tamime et Robinson

(2007b)) a démontré que dans une usine de transformation laitière, le brassage et le pompage du yogourt à travers des coudes à angle de 90° occasionnait une diminution de la viscosité et de la fermeté ainsi qu'une augmentation de la synérèse. Ceci serait dû à l'augmentation de la perte de charge (conversion de l'énergie mécanique en friction) occasionnée par le débit laminaire dans le tuyau en présence de coudes. Cette augmentation du frottement entre le yogourt et les parois des tuyaux entraîne un cisaillement plus prononcé et contribue à modifier le réseau protéique du yogourt (Tamime & Robinson, 2007b; Smith, 2011). Dans ce chapitre, la tortuosité du BEP n'a pas produit les mêmes résultats que Steenbergen (1971c) qui a utilisé un flux laminaire de 3600 L/h. Contrairement à cet auteur, les deux configurations BEP ont produit un débit de (90 L/h), ce qui semble insuffisant pour obtenir des résultats comme ceux observés par Steenbergen (1971c).

Les résultats dans ce chapitre ont démontré que la teneur en acide lactique produite par un refroidissement rapide (74 g/L) était moins élevée que celle produite par un refroidissement lent (90 g/L) et que sa valeur de pH (4,29) était plus élevée que celle du yogourt refroidit lentement (4,19). La vitesse de refroidissement pour abaisser la température de 20 à 5°C a un impact sur l'acidification tel qu'attendu avec les résultats du chapitre précédent. Rasic et Kurmann (1978), Tamime et Robinson (2007b) et O'Rell et Chandan (2013) ont aussi observé qu'un accroissement du temps de refroidissement occasionnait une augmentation de l'acidité du yogourt puisque la production d'acide lactique est ralentie lorsque le yogourt atteint une température $\leq 10^{\circ}\text{C}$.

La vitesse de refroidissement a aussi affecté la viscosité avec l'entonnoir Posthumus du yogourt selon la teneur en matière grasse. Les yogourts YSG refroidis en 2,5 ou 17 h ont obtenu des temps d'écoulement similaires, tandis que les yogourts YFG ont obtenu des valeurs plus élevées. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus au chapitre 2 et à ceux de Martens (1972). Ce dernier a démontré que l'abaissement de pH de 4,3 à 4,2 durant un refroidissement lent (12 h), d'un yogourt brassé à la main et contenant 2% de matière grasse provoquait une augmentation de la fermeté et de la viscosité (entonnoir Posthumus). Cependant, les résultats de fermeté du yogourt YSG qui n'ont pas été affectés par la vitesse de refroidissement sont différents de ceux obtenus au chapitre précédent. Au chapitre 2, pour un même pH (4,6), les yogourts sans gras refroidis en 24 h (Y24) avaient obtenu une fermeté plus élevée que ceux ayant subi un refroidissement rapide de 5 h (Y5). La différence entre la durée du refroidissement

rapide et lent au chapitre 2 était de 19 h (24 - 5 h) et de 14,5 h (17 - 2,5 h) pour le chapitre 3. Il se peut alors qu'une augmentation de la durée du refroidissement de 14,5 h ne soit pas suffisante comparativement à 19 h pour obtenir une augmentation de la fermeté pour un yogourt brassé sans gras. Or, dans ce chapitre, il semblerait que l'abaissement de pH du yogourt YSG par le refroidissement lent (4,2) n'occasionnerait pas une augmentation de fermeté, contrairement au chapitre 2 auquel le yogourt sans gras avait obtenu une valeur de pH de 4,6 après le refroidissement lent. De plus, le cisaillement produit par les deux BEP n'était pas identique. Au chapitre 2, le BEP impliquait seulement un pompage, un lissage et un refroidissement (35 à 5°C), ce qui a produit des yogourts ayant une fermeté de 600 N/m². Dans le chapitre 3, les yogourts sans gras avaient une fermeté de 317 N/m², car le BEP comprenait un brassage en cuve, un pompage, un lissage, un écoulement dans une tuyauterie de plus de 9 m et un refroidissement (20 à 5°C). Avec un cisaillement plus prononcé, dans le chapitre 3, il se pourrait que la restructuration du yogourt ait été inhibée, ce qui pourrait expliquer cette différence de résultats.

Pour les résultats de synérèse, tout comme le chapitre 2, les valeurs des yogourts YR étaient similaires à celles des yogourts YL, suggérant que les vitesses de refroidissement utilisées dans cette étude n'ont pas eu d'impact. Kurmann (1967) a mentionné que dans un intervalle de pH entre 4,6 et 4,0, la synérèse du yogourt brassé est stable. Ceci pourrait expliquer pourquoi la baisse de pH, passant de 4,3 à 4,2, provoquée par le refroidissement lent n'a pas eu d'impact sur la synérèse. Cependant, Roefs et Van Vliet (1990) et Harwalkar et Kalab (1986) ont démontré que plus un yogourt ferme s'acidifie au-delà de la valeur du point isoélectrique des caséines (4,6), plus sa structure devient poreuse et perméable. L'accroissement de la porosité du réseau est dû à l'augmentation de la proportion des charges positives à la surface des caséines, ce qui augmente la répulsion entre elles et augmente l'indice de synérèse. Contrairement à ces études, le yogourt produit dans ce chapitre était de type brassé et non de type ferme, or la différence de microstructure (dispersion d'amas de protéines versus enchevêtements de protéines) pourrait expliquer cette différence. Les résultats semblent suggérer que, durant le refroidissement, l'abaissement de la valeur de pH de 4,3 à 4,2 ne modifie pas suffisamment la taille des pores pour avoir un effet sur la synérèse.

Comme dans le chapitre deux, les résultats des dénombrements des streptocoques et des lactobacilles obtenus dans ce chapitre étaient stables tout au long de l'entreposage. Ramchandran et Shah (2009) et Ramchandran et Shah (2010) ont obtenu des résultats similaires pour les populations des streptocoques, mais ont constaté un déclin de celles des lactobacilles. Par contre, Prasad *et al.* (2013) et Amani *et al.* (2017) ont observé une diminution de la population des streptocoques et des lactobacilles après 21 jours d'entreposage. Beal *et al.* (1999) a démontré que la concentration bactérienne durant l'entreposage était dépendante de l'acidité du yogourt, de la souche bactérienne et du temps d'entreposage. Dans ce chapitre, il semblerait que les souches bactériennes utilisées soient plus résistantes à la post-acidification, ce qui expliquerait l'absence d'une diminution des populations au 21^e jour.

Pendant l'entreposage de 21 jours, l'acidité des yogourts a augmenté passant de 73 à 82 g/L d'acide lactique et d'une diminution du pH de 4,33 à 4,15. Comme observé par plusieurs auteurs (Kurmann (1967), Renan *et al.* (2008b), Renan *et al.* (2008a), Renan *et al.* (2009), Beal *et al.* (1999), Renan *et al.* (2008b), Renan *et al.* (2009), Martens (1972), Rasic et Kurmann (1978), Afonso et Maia (1999) et Weidendorfer *et al.* (2008) cette post-acidification a provoqué une augmentation de la fermeté et de la viscosité. van Vliet *et al.* (1991), Vasbinder *et al.* (2003a) et Serra *et al.* (2009) ont démontré que durant l'entreposage, les propriétés rhéologiques d'un yogourt ferme ou brassé augmentent progressivement dû au nombre de liens hydrophiles entre les micelles de caséines qui se forment graduellement ce qui fait augmenter la viscosité et la fermeté. Cependant, les résultats obtenus durant l'entreposage avec l'entonnoir Posthumus ne reflètent pas ceux du rhéomètre. Ce dernier a démontré que la viscosité des yogourts YSG et YFG a augmenté pendant l'entreposage, alors que les résultats de viscosité obtenus à l'entonnoir Posthumus ont démontré que la viscosité durant l'entreposage a augmenté uniquement avec le yogourt YFG. Peu d'études ont comparé ces deux techniques d'analyse de la viscosité. Il est toutefois possible que l'analyse de viscosité effectuée avec l'entonnoir Posthumus dépend de l'indice de synérèse du yogourt. Pour le yogourt YSG, la synérèse était plus élevée (16%) que pour le yogourt YFG (6,8%). Or durant les deux premières minutes de l'écoulement du yogourt de l'entonnoir, c'est surtout du lactosérum qui s'écoule ce qui a possiblement biaisé l'analyse qui n'a duré que 2 à 4 minutes pour obtenir un écoulement de 259g. Vareltzis *et al.* (2016) ont démontré que l'incorporation d'eau (sans brassage) après la

fermentation du yogourt occasionne une viscosité plus faible comparativement à un yogourt dont l'addition d'eau s'est produite avant la fermentation. Ces auteurs ont expliqué que l'eau supplémentaire avant la fermentation devient emprisonnée durant la formation du réseau, alors que l'eau ajoutée après la gélification des protéines n'est pas incorporée dans le réseau, ce qui occasionne une plus faible viscosité. Dans le contexte de l'analyse avec l'entonnoir Posthumus de ce chapitre, le lactosérum du yogourt YSG n'était pas incorporé dans le réseau puisque la synérèse était élevée et aurait alors agi comme une incorporation d'eau après la fermentation. Donc, selon les résultats de ce chapitre, il est peu recommandable d'analyser la viscosité du yogourt avec l'entonnoir Posthumus lorsqu'il y a présence de synérèse.

Dans ce chapitre, la synérèse ne semble pas avoir été affectée par la durée de l'entreposage. Serra *et al.* (2009) ont observé une augmentation de la synérèse d'un yogourt, brassé à la cuillère, après 21 jours d'entreposage. Contrairement à cet auteur, le brassage dans ce chapitre s'est produit avec un banc d'essai et la teneur en solides totaux du yogourt était plus élevée ce qui expliquerait la différence dans les résultats obtenus. En effet, un brassage à la main produit un cisaillement moins uniforme et un yogourt ayant une teneur en solides totaux moins élevée créerait un réseau protéique moins fort qui aurait tendance à produire plus de synérèse (Tamime & Robinson, 2007a).

3.6. Conclusion

Dans cette étude, l'utilisation d'un banc d'essai pilote a permis d'uniformiser le brassage de yogourts avec et sans gras et ainsi obtenir le même type de cisaillement mécanique d'une production à l'autre. Ce banc d'essai a aussi permis d'étudier l'impact de la tortuosité de la conduite qui était composée de plusieurs coudes à angle de 90° sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques du yogourt brassé. L'utilisation de chambres environnementales a permis de modifier et de bien contrôler différentes vitesses de refroidissement afin de connaître leur impact sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques des yogourts brassés.

La présence de matière grasse a provoqué une augmentation de la fermeté et de la viscosité ainsi qu'une diminution de la synérèse du yogourt brassé. Par contre, la tortuosité des conduites lorsque le yogourt a été pompé à une vitesse de 90 L/h dans un système ouvert et non sous pression n'a eu aucun impact sur les propriétés des yogourts avec et sans gras. De plus, la vitesse de refroidissement, en entreposage, n'a pas eu d'impact sur les propriétés rhéologiques des yogourts sans gras. Par contre, pour les yogourts riches en gras, le refroidissement lent a provoqué une augmentation de la viscosité évaluée par l'entonnoir Posthumus. Durant l'entreposage des yogourts avec et sans gras, une augmentation de la viscosité et de la fermenté ont été observées.

Pour la suite du projet, il serait intéressant d'augmenter le débit, la pression et le nombre de coudes pour étudier, leur impact sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques d'un yogourt, brassé à l'aide de banc d'essai pilote.

Conclusion générale

La grande majorité des études scientifiques sur le yogourt brassé ont été réalisées en utilisant un brassage à la main et un refroidissement par immersion dans l'eau froide. Or il est complexe de reproduire en laboratoire un brassage et un refroidissement représentant bien le procédé industriel. Le but du projet était d'acquérir de nouvelles connaissances sur l'impact de la vitesse de refroidissement d'un yogourt à différentes teneurs en matière grasse, brassé à l'aide d'un banc d'essai pilote avec ou sans tortuosité sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques. Dans ce mémoire, l'utilisation d'un banc d'essai pilote a permis de se rapprocher de la réalité industrielle et la chambre environnementale a permis de contrôler précisément l'abaissement de la température. Il a été donc possible de vérifier si la tortuosité des conduites et la vitesse de refroidissement peuvent modifier l'évolution de l'acidité, de la fermeté, de la viscosité et de la synérèse du yogourt brassé avec ou sans gras. De plus, l'effet de la matière grasse sur la fermeté, la synérèse et les viscosités du yogourt brassé a été validé. Cependant, contrairement à ce qui a été attendu, l'effet de la tortuosité des conduites sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques n'a pas été confirmé dû à l'obtention d'un débit et d'une pression insuffisants.

Dans le deuxième chapitre, l'objectif était de déterminer l'impact de différentes vitesses de refroidissement de yogourts sans gras sur l'évolution de l'acidité, la synérèse, la fermeté et la viscosité durant l'entreposage. Lors de la production de yogourts, les étapes de standardisation, d'homogénéisation, de traitement thermique et de fermentation étaient identiques afin de minimiser leurs impacts sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques du yogourt brassé. Des analyses d'acidité, de fermeté, de viscosité et de synérèse ont été effectuées. Ce chapitre a permis de démontrer que peu importe le temps d'entreposage, un temps de refroidissement entre 5 et 24 heures n'a pas affecté différemment la viscosité et la synérèse, mais a influencé la fermeté du yogourt sans gras, brassé avec un banc d'essai pilote.

Au chapitre 3, l'objectif qui était de déterminer si la tortuosité des conduites et si un refroidissement lent peuvent modifier la fermeté, la viscosité et la synérèse d'un yogourt brassé avec ou sans gras, a été atteint. Des yogourts avec différentes teneurs en matière grasse ont été brassés à partir d'un banc d'essai pilote qui comportait une

configuration linéaire ou tortueuse. Comme dans le deuxième chapitre, les traitements de standardisation, d'homogénéisation et thermique et le temps de fermentation étaient identiques afin de minimiser leurs impacts sur l'acidité, la fermeté, la viscosité et la synérèse du yogourt brassé. Il a été démontré que le pompage (90 L/h) du yogourt à pression atmosphérique à travers les deux configurations a produit des yogourts ayant des propriétés rhéologiques et physicochimiques similaires. Or, la pression et le débit utilisés dans le banc d'essai pilote n'étaient pas suffisants pour engendrer un changement sur les propriétés du yogourt. Donc, pour les futures études, l'augmentation du débit ou de la pression de pompage (par l'ajout d'une valve à la fin du BEP) serait suggérée. Quant au refroidissement, deux autres vitesses de refroidissement ont été sélectionnées afin de refroidir des yogourts ayant différentes teneurs en matière grasse. La vitesse de refroidissement lente a fait augmenter l'acidité et la viscosité avec l'entonnoir Posthumus du yogourt avec gras, mais à l'exception de l'acidité, les propriétés du yogourt sans gras n'ont pas été influencées. Or, de futurs travaux pourraient focaliser sur l'application de différentes pressions à l'intérieur des conduites en système fermé, afin d'approfondir leur impact sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques du yogourt.

Finalement, les travaux réalisés dans le cadre de cette étude ont démontré que la présence de matière grasse augmente l'effet de l'entreposage sur les propriétés rhéologiques et physicochimiques du yogourt brassé et l'effet du refroidissement sur la viscosité avec l'entonnoir Posthumus.

Bibliographie

- A.A.C. CCIL** 2006 *Centre canadien d'information laitière. Profil sectoriel: le yogourt.* Ottawa: Agriculture et Agroalimentaire Canada
- A.A.C. CCIL** 2009 Secteur des aliments fonctionnels et des produits de santé naturels. <http://www.agr.gc.ca/fra/industrie-marches-et-commerce/statistiques-et-information-sur-les-marches/par-produit-secteur/secteur-des-aliments-fonctionnels-et-des-produits-de-sante-naturels/?id=1170856376710> (consulté le 05/06/2017)
- A.A.C. CCIL** 2016a *Centre canadien d'information laitière. Composition du lait à la ferme.* Ottawa: Agriculture et Agroalimentaire Canada
- A.A.C. CCIL** 2016b Consommation de produits laitiers par habitant au Canada - Annuelle. http://www.dairyinfo.gc.ca/index_f.php?s1=dff-fcil&s2=cons&s3=conscdn&s4=dpcons&page=consdppl (consulté le 05/03/2017)
- A.A.C. CCIL** 2016c Transformation de produits laitiers - yogourt. http://www.dairyinfo.gc.ca/index_f.php?s1=dff-fcil&s2=proc-trans&s3=psdp-pvpl&s4=yp-py&page=prodyogurt (consulté le 05/06/2017)
- Abu-Jdayil B, Nasser MS & Ghannam M** 2013 Structure Breakdown of Stirred Yoghurt in a Circular Pipe as Affected by Casein and Fat Content. *Food Science and Technology Research* **19**(2) 277-286
- Afonso IM, Cruz P, Maia JM & Melo LF** 2008 Simplified numerical simulation to obtain heat transfer correlations for stirred yoghurt in a plate heat exchanger. *Food and Bioproducts Processing* **86**(4) 296-303
- Afonso IM & Maia JM** 1999 Rheological monitoring of structure evolution and development in stirred yoghurt. *Journal of Food Engineering* **42**(4) 183-190
- Aliments Ultima** 2016 Yoghurt. <https://www.olympicdairy.com/products> (consulté le 03/05-2017)
- Amani E, Eskandari MH & Shekarforoush S** 2017 The effect of proteolytic activity of starter cultures on technologically important properties of yogurt. *Food Sci Nutr* **5**(3) 525-537
- Amiot J, Fournier S, Lebeuf Y, Paquin P & Simpson R** 2002 Composition, propriétés physicochimiques, valeur nutritive, qualité technologiques et techniques d'analyses du lait. In *Sciences et technologie du lait*, pp. 1-73 (Ed. CL Vignola). Presses internationales Polytechnique
- Anon** 1977 The Influence of the Cooling Rate on the Quality of Stirred Yoghurt. Danish Dairy Research Institute **publication No. 225**
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC)** 2000 Dairy products. In *Official methods in analytic of AOAC international*, Vol. 2, pp. 69-82 (Ed. W Horwitz)
- Barrantes E, Tamime AY, Sword AM, Muir DD & Kaláb M** 1996 The manufacture of set-type natural yoghurt containing different oils — 2: Rheological properties and microstructure. *International Dairy Journal* **6**(8-9) 827-837
- Bazinet L, Pouliot Y & Castaigne F** 2002 Opérations unitaires. In *Sciences et technologie du lait*, pp. 153-270 (Ed. CL Vignola). Presses internationales Polytechnique
- Beal C, Skokanova J, Latrille E, Martin N & Corrieu G** 1999 Combined effects of culture conditions and storage time on acidification and viscosity of stirred yogurt. *Journal of Dairy Science* **82**(4) 673-681
- Becker T & Puhan Z** 1989 Effect of different processes to increase the milk solids non-fat content on the rheological properties of yoghurt. *Milchwissenschaft* **44**(10) 626-629

- Brisson G & Singh H** 2013 Milk composition, physical and processing characteristics. In Manufacturing Yogurt and Fermented Milks, pp. 21-48 (Eds. RC Chandan & A Kilara)
- Bullard J** 2011 Interactions de bactéries lactiques productrices d'exopolysaccharides et effets sur les propriétés rhéologiques du yogourt, mémoire de Maîtrise. Université Laval, Canada
- Cayot P, Fairise JF, Colas B, Lorient D & Brulé G** 2003 Improvement of rheological properties of firm acid gels by skim milk heating is conserved after stirring. *Journal of Dairy Research* **70**(4) 423-431
- Chandan RC & O'Rell K** 2013a Ingredients for yogurt manufacture. In Manufacturing Yogurt and Fermented Milks, Second Edition, pp. 217-237 (Eds. RC Chandan & A Kilara)
- Chandan RC & O'Rell K** 2013b Principles of yogurt processing. In Manufacturing Yogurt and Fermented Milks, Second Edition, pp. 239-261 (Eds. RC Chandan & A Kilara)
- Creamer LK & Macgibbon AKH** 1996 Some recent advances in the basic chemistry of milk proteins and lipids. *International Dairy Journal* **6**(6) 539-568
- CSMOTA** 2013 *Étude sectorielle sur la fabrication des produits laitiers*, pp. 1-138. Québec: Comité sectoriel de main-d'œuvre en transformation alimentaire
- Dalgleish DG & Corredig M** 2012 The structure of the casein micelle of milk and its changes during processing. *Annual Review of Food Science and Technology* **3**(1) 449-467
- De Lorenzi L, Prich S & Torriano G** 1995 Rheological behaviour of low-fat and full-fat stirred yoghurt. *International Dairy Journal* **5**(7) 661-671
- Everett DW & McLeod RE** 2005 Interactions of polysaccharide stabilisers with casein aggregates in stirred skim-milk yoghurt. *International Dairy Journal* **15**(11) 1175-1183
- Fangary YS, Barigou M & Seville JPK** 1999 Simulation of yoghurt flow and prediction of its end-of-process properties using rheological measurements. *Food and Bioproducts Processing: Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part C* **77**(1) 33-39
- Galesloot THE** 1958 Investigations concerning the consistency of yoghurt. *Netherlands Milk & Dairy Journal* **12** 130-165
- Gentès MC, St-Gelais D & Turgeon SL** 2011 Gel formation and rheological properties of fermented milk with in situ exopolysaccharide production by lactic acid bacteria. *Dairy Science and Technology* **91**(5) 645-661
- Hahn C, Sramek M, Nöbel S & Hinrichs J** 2012 Post-processing of concentrated fermented milk: Influence of temperature and holding time on the formation of particle clusters. *Dairy Science and Technology* **92**(1) 91-107
- Haque A, Richardson RK & Morris ER** 2001 Effect of fermentation temperature on the rheology of set and stirred yogurt. *Food Hydrocolloids* **15**(4-6) 593-602
- Harwalkar VR & Kalab M** 1986 Relationship between microstructure and susceptibility to syneresis in yoghurt made from reconstituted nonfat dry milk. *Food Microstructure* **5**(2) 287-294
- Hassan AN, Frank JF, Schmidt KA & Shalabi SI** 1996 Textural Properties of Yogurt Made with Encapsulated Nonropy Lactic Cultures. *Journal of Dairy Science* **79**(12) 2098-2103
- Hess SJ, Roberts RF & Ziegler GR** 1997 Rheological Properties of Nonfat Yogurt Stabilized Using *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* Producing Exopolysaccharide or Using Commercial Stabilizer Systems. *Journal of Dairy Science* **80**(2) 252-263
- Holt C** 2016 Casein and casein micelle structures, functions and diversity in 20 species. *International Dairy Journal* **60** 2-13
- Horne DS** 2008 Casein Micelle Structure and Stability. In *Milk Proteins*, pp. 133-162 (Eds. A Thompson, M Boland & H Singh). Elsevier Inc.
- International Dairy Federation** 1991: International Standard ISO 11869 IDF 150: Lait fermenté - Détermination de l'acidité titrable.

- International Dairy Federation** 1997: International Standard ISO 7889 FIL 117: Lait et produits laitiers -*Streptococcus thermophilus* et *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *Bulgarius*.
- International Dairy Federation** 2006: International Standard ISO 3889 IDF 219: Lait et produits laitiers - Spécifications des fioles d'extraction de la matière grasse, type Mojonnier
- International Dairy Federation** 2016: International Standard ISO 89684 IDF 204: Lait et produits laitiers - Détermination de la teneur en azote
- Kamarides S, Stamou P & Massouras T** 2007 Comparison of the characteristics of set type yoghurt made from ovine milk of different fat content. *International Journal of Food Science and Technology* **42**(9) 1019-1028
- Krzeminski A, Großhable K & Hinrichs J** 2011 Structural properties of stirred yoghurt as influenced by whey proteins. *LWT - Food Science and Technology* **44**(10) 2134-2140
- Kurmann JA** 1967 Étude biotechnique sur la fabrication du yogourt doux et aromatique. communication II. Classification et description systématique des principales influences qui modifient la consistance, la viscosité, la séparation du serum. *Le Lait* **47**(467) 415-429
- Kutter A, Singh JP, Rauh C & Delgado A** 2011 Improvement of the Prediction of Mouthfeel Attributes of Liquid Foods by a Posthumus Funnel. *Journal of Texture Studies* **42**(3) 217-227
- Lee WJ & Lucey JA** 2003 Rheological properties, whey separation, and microstructure in set-style yogurt: Effects of heating temperature and incubation temperature. *Journal of Texture Studies* **34**(5-6) 515-536
- Lee WJ & Lucey JA** 2004 Structure and physical properties of yogurt gels: Effect of inoculation rate and incubation temperature. *Journal of Dairy Science* **87**(10) 3153-3164
- Lee WJ & Lucey JA** 2006 Impact of gelation conditions and structural breakdown on the physical and sensory properties of stirred yogurts. *Journal of Dairy Science* **89**(7) 2374-2385
- Lee WJ & Lucey JA** 2010 Formation and physical properties of yogurt. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* **23**(9) 1127-1136
- Lucey JA** 2001 The relationship between rheological parameters and whey separation in milk gels. *Food Hydrocolloids* **15**(4-6) 603-608
- Lucey JA** 2004a Cultured dairy products: An overview of their gelation and texture properties. *International Journal of Dairy Technology* **57**(2-3) 77-84
- Lucey JA** 2004b Formation, Structural Properties and Rheology of Acid-coagulated Milk Gels. In *Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology*, Vol. Volume 1, pp. 105-122 (Eds. PF Fox, PLH McSweeney, TM Cogan & TP Guinee). Academic Press
- Lucey JA & Singh H** 1997 Formation and physical properties of acid milk gels: A review. *Food Research International* **30**(7) 529-542
- Lucey JA, Teo CT, Munro PA & Singh H** 1997 Rheological properties at small (dynamic) and large (yield) deformations of acid gels made from heated milk. *Journal of Dairy Research* **64**(4) 591-600
- Lussier N** 2017 Impact du procédé industriel de brassage et de refroidissement sur les propriétés texturales et rhéologiques des yogourts brassés, mémoire de Maîtrise. Université Laval, Canada
- Maiocchi G** 2003 Fermented milk. *International Dairy Federation* (301) 202-210
- MAPAQ** 2016 *P-29, r. 1 Loi sur les produits alimentaires*, Section 11.8.3. Québec: Publications Québec
- Martens R** 1972 Influence de quelques facteurs sur la consistance et le goût du yogourt brassé. *Revue de l'Agriculture* **3** 461-480

- Michalski MC, Michel F, Sainmont D & Briard V** 2002 Apparent ζ -potential as a tool to assess mechanical damages to the milk fat globule membrane. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* **23**(1) 23-30
- Mizrahi S** 2010 Syneresis in food gels and its implications for food quality. In *Chemical Deterioration and Physical Instability of Food and Beverages*, pp. 324-348 (Eds. LH Skibsted, J Risbo & ML Andersen). Woodhead Publishing Limited
- Muramalla T & Aryana KJ** 2011 Some low homogenization pressures improve certain probiotic characteristics of yogurt culture bacteria and Lactobacillus acidophilus LA-K. *J Dairy Sci* **94**(8) 3725-3738
- O'Rell K & Chandan RC** 2013 Manufacture of Various Types of Yogurt. In *Manufacturing Yogurt and Fermented Milks*, Second Edition, pp. 263-295 (Eds. RC Chandan & A Kilara)
- Ozer B** 2010 Strategies for yogurt manufacturing. In *Development and Manufacture of Yogurt and Other Functional Dairy Products*, pp. 47-96 (Ed. F Yıldız). CRC Press
- Penna ALB, Converti A & De Oliveira MN** 2006 Simultaneous effects of total solids content, milk base, heat treatment temperature and sample temperature on the rheological properties of plain stirred yogurt. *Food Technology and Biotechnology* **44**(4) 515-518
- Prasad LN, Sherkat F & Shah NP** 2013 Influence of galactooligosaccharides and modified waxy maize starch on some attributes of yogurt. *J Food Sci* **78**(1) M77-83
- Puvanenthiran A, Williams RPW & Augustin MA** 2002 Structure and visco-elastic properties of set yoghurt with altered casein to whey protein ratios. *International Dairy Journal* **12**(4) 383-391
- Ramaswamy HS & Basak S** 1992 Time dependent stress decay rheology of stirred yogurt. *International Dairy Journal* **2**(1) 17-31
- Ramchandran L & Shah NP** 2009 Effect of exopolysaccharides on the proteolytic and angiotensin-I converting enzyme-inhibitory activities and textural and rheological properties of low-fat yogurt during refrigerated storage. *J Dairy Sci* **92**(3) 895-906
- Ramchandran L & Shah NP** 2010 Characterization of functional, biochemical and textural properties of synbiotic low-fat yogurts during refrigerated storage. *LWT - Food Science and Technology* **43**(5) 819-827
- Rao MA** 2014 Application of Rheology to Fluid Food Handling and Processing. In *Rheology of Fluid, Semisolid, and Solid Foods*, Vol. 3, pp. 415-454 (Ed. GV Barbosa-Cánovas). Springer
- Basic JL & Kurmann JA** 1978 Chapter 12- Cooling after incubation. In *Yoghurt - Scientific Grounds, Technology, Manufacture and Preparations*, Vol. 1, pp. 231-241 (Technical Dairy Publishing House)
- Remeuf F, Mohammed S, Sodini I & Tissier JP** 2003 Preliminary observations on the effects of milk fortification and heating on microstructure and physical properties of stirred yogurt. *International Dairy Journal* **13**(9) 773-782
- Renan M, Arnoult-Delest V, Pâquet D, Brûlé G & Famelart MH** 2008a Changes in the rheological properties of stirred acid milk gels as induced by the acidification procedure. *Dairy Science and Technology* **88**(3) 341-353
- Renan M, Guyomarc'h F, Arnoult-Delest V, Pâquet D, Brûlé G & Famelart MH** 2008b The rebodying of stirred yoghurt: Interactions between proteins. *Journal of Dairy Research* **75**(4) 450-456
- Renan M, Guyomarc'h F, Arnoult-Delest V, Pâquet D, Brûlé G & Famelart MH** 2009 Rheological properties of stirred yoghurt as affected by gel pH on stirring, storage temperature and pH changes after stirring. *International Dairy Journal* **19**(3) 142-148
- René F** 1997 Le technoscope de Biofutur. *167*(92) 1-7

- Robinson RK & Itsaranuwat P** 2007 Properties of Yoghurt and their Appraisal. In Fermented Milks, pp. 76-94 (Ed. A Tamime). Blackwell Publishing Ltd
- Robinson RK, Lucey JA & Tamime AY** 2007 Manufacture of Yoghurt. In Fermented Milks, pp. 53-75 (Ed. A Tamime). Blackwell Publishing Ltd
- Roefs SPF M, De Groot-Mostert AEA & Van Vliet T** 1990 Structure of acid casein gels 1. Formation and model of gel network. *Colloids and Surfaces* **50** 141-159
- Roefs SPF M & Van Vliet T** 1990 Structure of acid casein gels 2. Dynamic measurements and type of interaction forces. *Colloids and Surfaces* **50(C)** 161-175
- Rönnegård E & Dejmek P** 1993 Development and breakdown of structure in yoghurt studied by oscillatory rheological measurements. *Le Lait* **73(4)** 371-379
- Sandoval-Castilla O, Lobato-Calleros C, Aguirre-Mandujano E & Vernon-Carter EJ** 2004 Microstructure and texture of yogurt as influenced by fat replacers. *International Dairy Journal* **14(2)** 151-159
- Schellhaass SM & Morris HA** 1985 Rheological and Scanning Electron Microscopic Examination of Skim Milk Gels Obtained by Fermenting With Ropy and Non-Ropy Strains of Lactic Acid Bacteria. *Food structure* **4(2)** 279-287
- Schmitt L, Ghnassia G, Bimbenet JJ & Cuvelier G** 1998 Flow properties of stirred yogurt: Calculation of the pressure drop for a thixotropic fluid. *Journal of Food Engineering* **37(4)** 367-388
- Senge B** 2009 einfluss der Prozesstechnik auf die Strukturstabilität pastöser Milchprodukte (traduit en français). *Deutsche Milchwirtschaft* **15** 553-557
- Serra M, Trujillo AJ, Guamis B & Ferragut V** 2009 Evaluation of physical properties during storage of set and stirred yogurts made from ultra-high pressure homogenization-treated milk. *Food Hydrocolloids* **23(1)** 82-91
- Shaker RR, Jumah RY & Abu-Jdayil B** 2000 Rheological properties of plain yogurt during coagulation process: Impact of fat content and preheat treatment of milk. *Journal of Food Engineering* **44(3)** 175-180
- Singh H & Bennett RJ** 2002 Milk and Milk Processing. In *Dairy Microbiology Handbook: The Microbiology of Milk and Milk Products*, pp. 1-38 (Ed. RK Robinson). John Wiley and Sons, Inc.
- Smith PG** 2011 The Flow of Food Fluids. In *Introduction to Food Process Engineering*, pp. 79-124 (Ed. DR Heldman). Springer
- Sodini I, Remeuf F, Haddad S & Corrieu G** 2004 The relative effect of milk base, starter, and process on yogurt texture: a review. *Crit Rev Food Sci Nutr* **44(2)** 113-137
- Sodini I & Tong PS** 2013 Milk and milk-based ingredients. In *Manufacturing Yogurt and Fermented Milks*, pp. 177-191 (eds R. C. Chandan and A. Kilara). John Wiley and Sons, Inc.
- St-Gelais D & Haché S** 2006 Growth of proteinase-positive and proteinase-negative lactococci strains in reconstituted goat and cow milks. *Le Lait* **86(5)** 373-386
- Steenbergen AE** 1971a Cooling yoghurt by means of tube-type heat exchangers. *Official Orgaan FNZ* **63(42)** 996-998
- Steenbergen AE** 1971b Damage to the structure of yoghurt caused by pumps. *Voedingsmiddelentechnologie* **2(33)** 24-26
- Steenbergen AE** 1971c Damage to yoghurt structure during flow through pipes and constrictions. *Official Orgaan FNZ* **63(7)** 164-167
- Steffe JF, Mohamed IO & Ford EW** 1984 Pressure drop across valves and fittings for pseudoplastic fluids in laminar flow. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng* **27** 616-619

- Tamime AY & Deeth HC** 1980 Yoghurt: Technology and Biochemistry. *Journal of Food Protection* **43**(12) 939-977
- Tamime AY & Marshall VME** 1997 Microbiology and technology of fermented milks. In *Microbiology and Biochemistry of Cheese and Fermented Milk*, pp. 57-152 (Ed. BA Law). Blackie Academic & Professional
- Tamime AY & Robinson RK** 1999a Background to manufacturing practice. In *Yoghurt Science and technology*, pp. 11-108 (Woodhead Publishing)
- Tamime AY & Robinson RK** 1999b Processing plants and equipments. In *Yoghurt Science and technology*, pp. 129-245 (Woodhead Publishing)
- Tamime AY & Robinson RK** 2007a 2 - Background to manufacturing practice. In *Tamime and Robinson's Yoghurt* (Third edition), pp. 13-161 (Woodhead Publishing)
- Tamime AY & Robinson RK** 2007b 3- Processing plants and equipment. In *Tamime and Robinson's Yoghurt* (Third edition), pp. 162-283 (Woodhead Publishing)
- Tamime AY & Robinson RK** 2007c Biochemistry of fermentation. In *Tamime and Robinson's Yoghurt* (Third edition), pp. 535-607 (Woodhead Publishing)
- Torres IC, Janhøj T, Mikkelsen BT & Ipsen R** 2011 Effect of microparticulated whey protein with varying content of denatured protein on the rheological and sensory characteristics of low-fat yoghurt. *International Dairy Journal* **21**(9) 645-655
- van Marle M** 1998 Structure and rheological properties of yoghurt gels and stirred yoghurts, Ph.D. thesis University of Twente, the Netherlands
- van Vliet T** 1982 Influence of the composition of the milk fat globule membrane on the rheological properties of acid milk gels. *Netherlands Milk and Dairy Journal* **36**(3) 261-265
- van Vliet T, van Dijk HJM, Zoon P & Walstra P** 1991 Relation between syneresis and rheological properties of particle gels. *Colloid & Polymer Science* **269**(6) 620-627
- Vareltzis P, Adamopoulos K, Stavrakakis E, Stefanakis A & Goula AM** 2016 Approaches to minimise yoghurt syneresis in simulated tzatziki sauce preparation. *International Journal of Dairy Technology* **69**(2) 191-199
- Vasbinder AJ, Alting AC, Visschers RW & de Kruif CG** 2003a Texture of acid milk gels: formation of disulfide cross-links during acidification. *International Dairy Journal* **13**(1) 29-38
- Vasbinder AJ & de Kruif CG** 2003 Casein-whey protein interactions in heated milk: the influence of pH. *International Dairy Journal* **13**(8) 669-677
- Vasbinder AJ, Rollema HS, Bot A & De Kruif CG** 2003b Gelation mechanism of milk as influenced by temperature and pH; studied by the use of transglutaminase cross-linked casein micelles. *Journal of Dairy Science* **86**(5) 1556-1563
- Vasbinder AJ, van de Velde F & de Kruif CG** 2004 Gelation of Casein-Whey Protein Mixtures. *Journal of Dairy Science* **87**(5) 1167-1176
- Weidendorfer K, Bienias A & Hinrichs J** 2008 Investigation of the effects of mechanical post-processing with a colloid mill on the texture properties of stirred yogurt. *International Journal of Dairy Technology* **61**(4) 379-384
- Wilhelm LR, Dwayne AS & Gerald HB** 2004 Fluid flow. In *Food and Process Engineering Technology*, pp. 65-110 (American Society of Agricultural Engineers)
- Yildiz F** 2010 Overview of yogurt and other fermented dairy products. In *Development and Manufacture of Yogurt and Other Functional Dairy Products*, pp. 1-45 (Ed. F Yildiz). CRC Press

Annexe

Annexe 1 : Programmation des vitesses de refroidissement dans la chambre environnementale Burnsco

Tableau A1: Programmation d'une vitesse de refroidissement de 5 heures.

# d'étape	Type d'étape	T°C de consigne	Temps	Stade de refroidissement des pots de yogourt
			H M S	
1	Rampe	0	00 :00 :01	
2	Plateau	0	00 :00 :01	1 ^e stade (35-20°C)
3	Plateau	0	00:30:00	
4	Rampe	0-15	00:05:00	
5	Rampe	15-4	04:00:00	
6	Plateau	4	00:02:00	2 ^e stade (20-5°C)
7	Maintien	4	-	

Plateau : Étape ayant une température statique

Rampe : Étape ayant une température variable

Tableau A2: Programmation d'une vitesse de refroidissement de 24 heures.

# d'étape	Type d'étape	T°C de consigne	Temps	Stade de refroidissement des pots de yogourt
			H M S	
1	Rampe	0	00 :00 :01	
2	Plateau	0	00 :00 :01	1 ^e stade (35-20°C)
3	Plateau	0	00:30:00	
4	Rampe	0-10	00:05:00	
5	Plateau	10	02:30:00	
6	Rampe	10-4	21:30:00	2 ^e stade (20-5°C)
7	Plateau	4	00:02:00	
8	Maintien	4	-	

Plateau : Étape ayant une température statique

Rampe : Étape ayant une température variable

Tableau A3: Programmation d'une vitesse de refroidissement de 72 heures.

# d'étape	Type d'étape	T°C de consigne	Temps H M S	Stade de refroidissement des pots de yogourt
1	Rampe	0	00 :00 :01	
2	Plateau	0	00 :00 :01	1 ^e stade (35-20°C)
3	Plateau	0	00:30:00	
4	Rampe	0-15	00:05:00	
5	Rampe	15-4	72:00:00	
6	Plateau	4	00:02:00	2 ^e stade (20-5°C)
7	Maintien	4	-	

Plateau : Étape ayant une température statique

Rampe : Étape ayant une température variable