



**Étude comparative de deux méthodes de fabrication de yogourt  
grec à échelle pilote utilisant l'ultrafiltration comme technique  
de concentration**

*Étude basée sur la méthode d'Analyse de Cycle de Vie*

**Mémoire**

**Adriana Paredes Valencia**

**Maîtrise en sciences et technologie des aliments**

**Maître ès sciences (M. Sc.)**

Québec, Canada

© Adriana Paredes Valencia, 2016

**Étude comparative de deux méthodes de fabrication de yogourt  
grec à échelle pilote utilisant l'ultrafiltration comme technique  
de concentration**

*Étude basée sur la méthode d'Analyse de Cycle de Vie*

**Mémoire**

**Adriana Paredes Valencia**

Sous la direction de :

Yves Pouliot, directeur de recherche  
Alain Doyen, codirecteur de recherche

## Résumé du mémoire

Le yogourt grec, pouvant être obtenu par concentration du yogourt traditionnel par ultrafiltration (UF), connaît une croissance exceptionnelle en Amérique du Nord (+100% depuis 2012), et représente le premier segment de marché des produits laitiers fermentés en 2014. Cependant, d'un point de vue environnemental, la production du yogourt grec fait face à plusieurs enjeux et défis. Son élaboration nécessite trois fois plus de lait que le yogourt traditionnel de par l'étape de concentration nécessaire à l'atteinte de la concentration protéique cible. De plus, l'étape d'UF du yogourt génère un perméat acide (coproduit du yogourt) difficilement valorisable.

Néanmoins, une alternative consistant à effectuer l'étape d'UF sur le lait avant sa fermentation permet d'éliminer la production du perméat acide, et génère un perméat de lactosérum doux déprotéiné dont les voies de valorisation sont davantage connues. Cette stratégie pourrait donc potentiellement réduire l'impact environnemental du procédé et générer des coproduits plus facilement valorisables, améliorant ainsi l'écoefficient du procédé de fabrication de yogourt grec.

Dans cette optique, ce projet de recherche visait à comparer l'impact environnemental sur l'ensemble du cycle de vie de la production de yogourt grec selon deux procédés : en effectuant l'étape de concentration par UF avant l'étape de fermentation (UF LAIT), ou après (UF YOG) comme utilisé dans l'industrie. Ainsi, des expérimentations à échelle pilote ont été réalisées dans le but de comparer ces deux procédés.

Le nouveau procédé (UF LAIT) permettrait une réduction des consommations d'énergie à l'étape de transformation étant donné que l'UF du lait avant fermentation permet de réduire la quantité de matière première à transformer d'environ un tiers. Cependant l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) des deux procédés donne comme résultat un bilan environnemental défavorable à (UF LAIT) comparativement au procédé traditionnel (UF YOG) à cause d'une plus grande consommation de lait, qui est responsable d'environ 80% des impacts sur le cycle de vie du yogourt grec. Cet impact majeur pour UF LAIT l'est encore même lorsque dans une analyse de sensibilité le perméat doux de UF LAIT est alloué à l'étape d'UF contrairement au perméat acide de UF YOG qui est considéré comme un déchet non valorisable.

# Table des matières

Résumé du mémoire.....	iii
Table des matières.....	iv
Liste des tableaux.....	vi
Liste des figures.....	vii
Remerciements .....	viii
Avant-propos.....	ix
Introduction .....	1
<b>Chapitre 1. État des connaissances .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Le yogourt traditionnel – rappel historique .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Les yogourts concentrés .....</b>	<b>4</b>
<b>1.3 Procédé de fabrication du yogourt traditionnel.....</b>	<b>5</b>
<b>1.4 Méthodes de production industrielle de yogourt grec.....</b>	<b>9</b>
1.4.1 Égouttage à l'aide de sacs en tissu .....	9
1.4.2 Concentration par centrifugation .....	9
1.4.3 Ajout de solides du lait.....	10
1.4.4 Concentration par ultrafiltration (UF) .....	11
<b>1.5 Procédés baromembranaires et ultrafiltration.....</b>	<b>13</b>
<b>1.6 Ultrafiltration du lait écrémé pour la fabrication du yogourt grec .....</b>	<b>19</b>
<b>1.7 Ultrafiltration du yogourt .....</b>	<b>21</b>
<b>1.8 Impact environnemental de la production de yogourt concentré.....</b>	<b>22</b>
<b>1.9 Mesure de l'empreinte environnementale .....</b>	<b>23</b>
1.9.1 La méthodologie d'analyse de cycle de vie (ACV) .....	24
1.9.2 Base de donnée Québécoise d'Inventaire de Cycle de Vie (BD - ICV) .....	27
1.9.3 Processus multifonctionnels : procédures d'allocation .....	28
1.9.4 Évaluation d'impacts : description des catégories d'impacts selon la méthode IMPACT 2002+ .....	30
<b>Chapitre 2. Hypothèse de recherche et objectifs .....</b>	<b>32</b>
<b>2.1 Hypothèse .....</b>	<b>32</b>
<b>2.2 Objectifs .....</b>	<b>32</b>
<b>Chapitre 3. Effect of performing ultrafiltration on milk prior to fermentation on mass balance and process efficiency of greek-style yogurt manufacture.....</b>	<b>33</b>
<b>3.1 Abstract .....</b>	<b>33</b>
<b>3.2 Introduction.....</b>	<b>33</b>
<b>3.3 Materials and methods.....</b>	<b>35</b>
3.3.1 Milk and starter culture .....	35
3.3.2 Ultrafiltration system .....	35
3.3.3 Greek-style yogurt production .....	36
3.3.4 Yogurt concentration by UF (UF-YOG) .....	37
3.3.5 Skim milk concentration by UF before fermentation (UF-MILK).....	38
3.3.6 Energy consumption during UF .....	38
3.3.7 Analytical methods.....	39
3.3.8 Statistical analyses .....	39
<b>3.4 Results and discussion.....</b>	<b>39</b>

3.4.1	Compositional characteristics of initial milk, retentates, GSY and permeates .....	39
3.4.2	Acidification curve during conventional and GSY production.....	41
3.4.3	Ultrafiltration performances .....	42
3.4.4	Comparative mass balance .....	43
<b>3.5</b>	<b>Conclusions .....</b>	<b>44</b>
<b>3.6</b>	<b>Acknowledgements .....</b>	<b>45</b>
<b>Chapitre 4. Évaluation de l'impact environnemental des deux procédés de fabrication de yogourt concentré .....</b>		
<b>4.1</b>	<b>Objectif de l'étude.....</b>	<b>46</b>
<b>4.2</b>	<b>Champ d'étude.....</b>	<b>47</b>
4.2.1	Définition de la fonction .....	47
<b>4.3</b>	<b>Unité Fonctionnelle .....</b>	<b>48</b>
<b>4.4</b>	<b>Frontières des systèmes.....</b>	<b>48</b>
4.4.1	Description du système de fabrication de yogourt concentré par [UF YOG] .....	49
4.4.2	Description du système de fabrication de yogourt concentré par [UF LAIT].....	50
<b>4.5</b>	<b>Flux de références et paramètres clés .....</b>	<b>50</b>
4.5.1	Allocation des processus multifonctionnels .....	61
4.5.2	Données disponibles .....	63
<b>4.6</b>	<b>Résultats : impacts environnementaux des deux systèmes de fabrication de yogourt.....</b>	<b>64</b>
4.6.1	Contributions aux dommages par étape de fabrication pour chaque procédé de référence.....	65
4.6.2	Comparaison des impacts des deux systèmes de référence par catégorie de dommages sans transport ni production.....	67
4.6.3	Contributions aux dommages de chaque étape des deux systèmes de référence, sans production ni transport .....	68
<b>4.7</b>	<b>Conclusion sur l'ACV comparative des systèmes de référence décrits ...</b>	<b>69</b>
<b>4.8</b>	<b>Analyses de sensibilité .....</b>	<b>70</b>
4.8.1	Allocation économique sur la crème et les perméats.....	70
4.8.2	Allocation : perméat acide considéré comme déchet.....	75
4.8.3	Conclusion sur les analyses de sensibilité .....	76
<b>4.9</b>	<b>Discussion sur les incertitudes et limites de l'étude .....</b>	<b>77</b>
<b>Chapitre 5. Conclusion générale.....</b>		
<b>Bibliographie .....</b>		
		<b>80</b>

## Liste des tableaux

Tableau 1 : composition globale de 100g yogourt nature .....	6
Tableau 2 : comparaison de la composition globale des yogourts concentrés (à partir de lait entier) .....	13
Tableau 3 : Variables opérationnelles lors du procédé d'ultrafiltration.....	17
Tableau 4 : Paramètres à optimiser lors du procédé d'ultrafiltration.....	19
Table 5 : Comparative composition of UF fractions and final composition of greek-style yogurts .....	40
Table 6: Comparative rejection coefficient of the 30 kDa upon UF of milk or yogurt .....	42
Tableau 7 : fonctions principale et secondaires .....	47
Tableau 8 : Étapes exclues des systèmes de produits .....	48
Tableau 9 : Paramètres clés et hypothèses associées.....	51
Tableau 10 : bilan de matière comparatif des deux procédés .....	55
Tableau 11 : Calculs des flux de références pour UF YOG .....	58
Tableau 12 : Calculs des flux de références pour UF LAIT .....	60
Tableau 13 : calcul des facteurs d'allocation .....	62
Tableau 14 : Allocation massique sur base de matière sèche pour les étapes d'écémage et d'ultrafiltration des deux systèmes .....	62
Tableau 15 : Données Ecoinvent utilisées pour la modélisation.....	64
Tableau 16 : prix payé à la production des substances laitières (PLQ).....	71
Tableau 17 : prix estimé des produits sortants des systèmes .....	71
Tableau 18 : Allocation économique pour les étapes d'écémage et d'ultrafiltration des deux procédés.....	71

## Liste des figures

Figure 1 : Procédé de production du yogourt conventionnel (non concentré) .....	7
Figure 2 : Procédés de production du yogourt concentré par UF à partir du lait écrémé et pasteurisé.....	12
Figure 3 : Présentation d'un système de filtration membranaire.....	14
Figure 4 : Comparaison des technologies baromembranaires .....	14
Figure 5 : Module membrane spiralé .....	16
Figure 6 : Méthodologie de l'ACV selon la norme ISO 14040.....	26
Figure 7 : Greek-style yogurt processing including UF concentration step.....	37
Figure 8 : Acidification curves during conventional yogurt and retentate fermentation for Greek-style yogurt production .....	41
Figure 9 : Average mass balance of milk components as influenced by GSY production method .....	44
Figure 10 : Frontières du système : fabrication de yogourt concentré par [UF YOG].....	49
Figure 11 : Frontières du système : fabrication de yogourt concentré par [UF LAIT] .....	50
Figure 12 : Comparaison des impacts des deux systèmes selon les catégorie de dommages (allocation massique) .....	65
Figure 13 : Contributions aux dommages par étape pour chaque système (allocation massique).....	66
Figure 14 : Comparaison des impacts des deux systèmes par catégorie de dommages, sans production ni transport du lait (allocation massique) .....	67
Figure 15 : Contributions aux dommages par étape de fabrication sans production et transport.....	69
Figure 16 : Comparaison des impacts des deux systèmes selon les catégorie de dommages (allocation économique) .....	73
Figure 17 : Comparaison des contributions aux dommages par étape pour chaque système (allocation économique).....	73
Figure 18: Comparaison allocation massique vs allocation économique pour les deux procédés, sans production ni transport.....	74
Figure 19 : Comparaison des impacts des deux systèmes selon les catégorie de dommages (perméat UF YOG déchet) .....	75
Figure 20 : Comparaison des contributions aux dommages par étape pour chaque système (perméat UF YOG déchet).....	76

## Remerciements

À mon directeur de recherche Yves Pouliot pour son encouragement.

À mon codirecteur Alain Doyen pour sa disponibilité et sa bonne humeur.

À Manuele Margni, professeur à l'École Polytechnique de Montréal pour son expertise et sa collaboration dans ce projet.

À toute l'équipe des laboratoires : Diane Gagnon, Mélanie Martineau, Pascal Lavoie.

À mes collègues : Mathilde Leu, Julien Chamberland, Stéphanie Méthot-Hains, Scott Benoît.

Aux stagiaires : Camile Gavazzi-April, Valentin Fouelefack.

Pour leur soutien financier : aux Fonds de Recherche du Québec Nature et Technologies (FQRNT), à Novalait Inc. et au Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ).

À mon conjoint Frédéric pour son appui et sa patience pendant ces deux années de retour aux études.

## Avant-propos

Ce mémoire fait partie du projet de recherche de Novalait Inc. portant sur *l'amélioration de l'éco-efficience des procédés de transformation du lait par une utilisation optimale des constituants du lait : le cas du yogourt grec*, dont le chercheur principal est Yves Pouliot. L'objectif général de ce mémoire est la caractérisation de l'impact du choix technologique sur les performances d'un procédé de fabrication d'un yogourt grec modèle.

Ce document est composé de cinq chapitres. Le premier chapitre présente une revue de littérature sur les aspects importants des méthodes de production de yogourt grec, le procédé de concentration par ultrafiltration, l'impact environnemental de la production de yogourt grec, et l'outil de mesure de l'empreinte environnementale : Analyse de Cycle de Vie. Le chapitre 2 comprend l'hypothèse de recherche et les objectifs poursuivis. Le chapitre 3 est rédigé sous forme d'article scientifique, en anglais, et décrit les travaux réalisés ainsi que les résultats obtenus au cours de la fabrication à échelle pilote des deux yogourts grecs de référence. L'article : *Effect of performing ultrafiltration on milk prior to fermentation on mass balance and process efficiency of greek-style yogurt manufacture* est en préparation pour soumission dans le «Journal of Food Engineering». Le chapitre 4 présente les résultats de l'Analyse de Cycle de Vie comparative entre les deux procédés étudiés. Le chapitre 5 présente la discussion générale, la conclusion et les perspectives.

Mme Adriana Paredes Valencia est l'auteure principale de toutes les sections constituant ce mémoire ainsi que l'article inséré. Elle a développé le protocole expérimental et elle a analysé les résultats obtenus. Le directeur et co-directeur de recherche Yves Pouliot et Alain Doyen de l'Université Laval, ainsi que le collaborateur Manuele Margni du CIRAIQ de l'École Polytechnique de Montréal ont supervisé et corrigé ce travail de recherche.

## Introduction

L'industrie laitière est sans cesse à la recherche de nouveaux produits qui plairont au consommateur et permettront aux entreprises de faire croître leurs parts de marché. Une diversification marquée dans la gamme des produits dits spécialités laitières (brevages, desserts lactés et produits fermentés) a été observée au cours des dernières années. Le plus récent, avec une grande explosion dans le marché nord-américain, est le yogourt grec.

Traditionnellement le yogourt grec est obtenu par égouttage. Toutefois à l'échelle industrielle, le procédé d'ultrafiltration est majoritairement utilisé afin de retirer le lactosérum contenu dans le yogourt conventionnel et d'obtenir ainsi un yogourt concentré.

La dénomination « yogourt grec » est aujourd'hui utilisée aux États-Unis et au Canada pour commercialiser un yogourt concentré obtenu à partir de lait écrémé. Le yogourt grec est devenu très recherché par les consommateurs, du fait qu'il est caractérisé par une haute teneur en protéines ( $\approx 10\%$ ) comparativement aux yogourts réguliers (4-5 %) et généralement par un faible taux de matière grasse.

Pour ces raisons, la demande des consommateurs pour les yogourts grecs connaît actuellement une forte croissance. Ainsi, aux États-Unis, en 2008, la part de marché des yogourts grecs est passée de 4 % à 44 % de tous les yogourts vendus (1). À la fin de l'année 2013, le marché de ces produits a été estimé à près de 2 milliards \$ aux É.-U. (2).

Au Canada, en 2013, les yogourts grecs absorbent une part de marché de 23% avec une croissance de 100% depuis 2012 (3) comparativement aux yogourts naturels, biologiques dont les parts de marché sont de 40%. Cette augmentation de la demande est susceptible de demeurer constante dans les années à venir, en jugeant la place croissante que ces produits occupent dans les épiceries du Québec.

Bien que la production industrielle du yogourt grec soit économiquement rentable, plusieurs questions ont été soulevées sur l'impact environnemental que représente sa production. En effet, la fabrication de ce produit nécessite deux à trois fois plus de lait que celle du yogourt traditionnel, ainsi, seulement un tiers du lait mis en œuvre est conservé

dans le produit final. De plus, lors de l'étape de concentration par ultrafiltration du yogourt, l'élimination du lactosérum génère les deux tiers du volume restant du lait dans un coproduit acide très polluant et difficilement valorisable (2) (4).

Afin de minimiser la production de lactosérum acide, plusieurs choix technologiques sont disponibles. Outre la concentration du lait initial par l'ajout de solides non gras du lait (poudre de lait écrémé), la concentration du lait par ultrafiltration avant-fermentation pourrait s'avérer une option d'intérêt en permettant de retirer un coproduit non acidifié, plus facilement valorisable. Néanmoins, aucune donnée comparative n'existe à cet effet dans la littérature récente.

Dans cette optique, une évaluation des impacts environnementaux de chaque procédé sera réalisée en s'appuyant sur l'outil d'évaluation environnementale Analyse de Cycle de Vie encadrée par les normes ISO 14040 et 14044. Les résultats et recommandations de cette étude à échelle pilote servira de base au développement futur d'outils d'aide à la décision pour les entreprises productrices de yogourt grec.

# Chapitre 1. État des connaissances

## 1.1 Le yogourt traditionnel – rappel historique

Le yogourt est le résultat d'une des plus anciennes méthodes de conservation du lait. Il est estimé qu'autour de 1000 - 500 avant JC avec la domestication des animaux producteurs de lait (vaches, moutons, chèvres, etc.), les produits laitiers ont été incorporés dans l'alimentation humaine (5).

Le mot yogourt, écrit également « yoghurt » (en anglais) et « yaourt » (en français) est un terme utilisé par les populations Turques nomades qui provient du verbe turc "*de yoğurmak*", signifiant « cailler, épaissir, coaguler » (6).

Les premiers yogourts résultent d'une découverte au hasard. Les bergers du Moyen-Orient ont constaté que le lait fermentait spontanément quand il était en contact avec les estomacs des bovins (sous l'influence de la microflore intestinale). En conséquence, ils ont appris à préserver et à conserver le lait pendant des longues périodes. C'est ainsi que pendant des millénaires, la fermentation du lait était la seule méthode connue pour conserver le lait (5).

En plus de permettre la conservation du lait frais, les bienfaits pour la santé humaine du yogourt étaient aussi reconnus par les Turcs qui l'utilisent pour soulager la diarrhée et les crampes abdominales. C'est en 1542 que le roi de France fait connaître le yogourt en occident. Mélangé avec toute une variété d'ingrédients il a été introduit comme dessert (5).

Au 20ème siècle, Stamen Grigorov, un étudiant en médecine, a été le premier à découvrir la bactérie lactique *L. bulgaricus*, utilisée aujourd'hui encore dans la fabrication de yogourt. Ses conclusions sur les avantages des bactéries lactiques ainsi que les recherches amenées par l'institut Pasteur de Paris ont amené le yogourt à être vendu dans les pharmacies comme un médicament (5).

La commercialisation de yogourt a commencé en France autour de la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale avec la création de Dannon (Danone France) par Daniel Carasso d'origine barcelonaise qui avait commencé à produire du yogourt avec des confitures (7).

Aujourd'hui, le code d'usage relatif à la production et à la commercialisation du yogourt indique que la dénomination « yogourt » est réservée au lait fermenté obtenu spécifiquement par le développement symbiotique de deux bactéries lactiques : *Streptococcus salivarius subsp. thermophilus* et *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus*. Cette appellation oblige la présence active de cultures lactiques à un ratio minimal de  $10^7$  UFC/g dans le produit final, la composition en protéines du lait à un taux minimal de 2,7 % (m/m), un contenu en matière grasse inférieur à 15 % et une acidité titrable exprimée en pourcentage d'acide lactique de 0,6 % (8).

Le type de yogourt consommé dans le monde est influencé par les modes de vie des populations. Par exemple, en Europe orientale et en Asie, les gens consomment du kéfir ou koumis issus de la fermentation du lait en combinant des bactéries et des levures. Sur le marché actuel une grande variété de yogourts est proposée au consommateur. Ces derniers présentent différentes caractéristiques en termes de saveur, et de textures, inclus ou non l'ajout des souches probiotiques, utilisent des laits biologiques, etc. Chacun de ces produits est obtenu généralement par l'ajout ou la modification d'une ou plusieurs étapes pendant leur fabrication. En Amérique du Nord, la tendance actuelle des consommateurs est de rechercher des produits ayant des avantages nutritionnels notamment ayant une forte concentration en protéines. Ainsi, la haute teneur en protéines de certains yogourts, comme le yogourt grec, qui est deux à trois fois plus élevée que celle des yogourts conventionnels, a engendré une hausse vertigineuse des ventes des yogourts concentrés de plus de 375% depuis 2012 (9) (10).

## 1.2 Les yogourts concentrés

Le yogourt concentré est connu dans plusieurs pays du monde, sous différents les noms : Labneh dans l'Est Méditerranéen, Straggisto en Grèce, et comme *Greek-style* en Angleterre.

Traditionnellement, le procédé de fabrication du yogourt concentré consiste dans l'élimination du lactosérum contenu dans le yogourt conventionnel par égouttage au travers soit de la peau d'un animal, d'un vase de terre ou bien de sacs en tissu. L'écoulement du lactosérum présent dans le yogourt traditionnel produit une

augmentation du produit en solides totaux. Cette étape de concentration du yogourt permet l'obtention d'un yogourt caractéristique présentant une texture crémeuse et une saveur légère (11).

Dans certains pays comme l'Angleterre la base pour la fabrication de yogourt *Greek-style* est le lait entier complété avec de la crème jusqu'à l'obtention d'un produit avec 7% de matière grasse (11) ce qui lui confère les caractéristiques organoleptiques recherchées pour ce type de produit.

En Amérique du nord le yogourt concentré a été introduit en 2005 et est connu commercialement sous le nom de « *Yogourt Grec (Greek-style Yogurt)* ». Le yogourt grec produit en Amérique du Nord est fait, à différence du yogourt traditionnel, à partir de lait écrémé (12). Au Canada il n'existe pas de cadre légal sur la dénomination « *Yogourt Grec* » (13), contrairement aux certains pays d'Europe, comme la France, où cette appellation est protégée (14).

Le yogourt grec d'Amérique du Nord est un produit très recherché par le consommateur pour sa valeur en protéines et son faible contenu en matière grasse. La teneur en protéines de ce yogourt est deux à trois fois plus que celle d'un yogourt conventionnel, sa texture très crémeuse donne comme résultat un effet de satiété apprécié par le consommateur. Le yogourt grec a connu une croissance du marché significative, par exemple, en 2012 aux États-Unis le yogourt grec représentait 30% du total du marché des yogourts.

Dans le but de comprendre la fabrication de yogourt grec, les différentes étapes de fabrication du yogourt traditionnel seront vues dans les paragraphes suivants. Les différentes méthodes d'obtention de ce type de yogourt seront vues plus en détail dans la partie 1.4.

### 1.3 Procédé de fabrication du yogourt traditionnel

Le yogourt est un produit laitier fermenté et acidifié par l'effet symbiotique des deux bactéries thermophiles. Les normes de composition stipulent que le yogourt peut contenir des ingrédients dérivés du lait (de la poudre de lait écrémé, ou des concentrés de lait, de lactosérum, des caséines, ou de la crème), des fruits, des confitures, des édulcorants, des agents de texture (stabilisants, gélifiants, épaississants), et un agent de conservation (15).

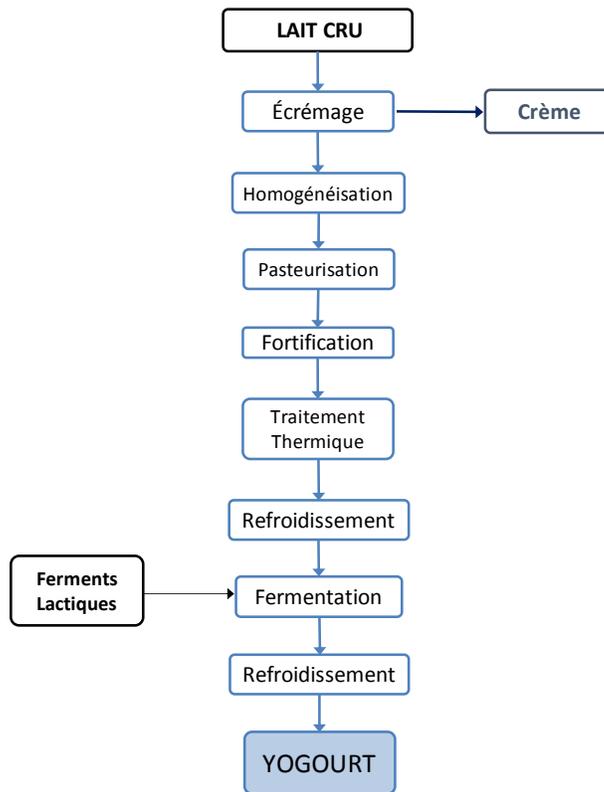
La valeur nutritive d'un yogourt nature est la même que celle du lait avec lequel il a été fabriqué soit du lait entier, demi-écrémé ou écrémé. De ce fait le yogourt est une source de protéines, de calcium, de potassium, de vitamines (A, D, B12) et des bactéries spécifiques qui contribuent à une alimentation saine.

Le Tableau 1 montre la composition globale moyenne de 100g yogourt nature fabriqué à partir de lait écrémé. (15) (16)

**Tableau 1 : composition globale de 100g yogourt nature**

Composant	Yogourt nature (100 g)
<b>Énergie (Kcal)</b>	54
<b>Matière sèche</b>	14,3
<b>Protéines (g)</b>	4,1
<b>Lipides (g)</b>	3,5
<b>Glucides (g)</b>	5,3
<b>Acide Lactique</b>	1
<b>Matières grasses (g)</b>	< 0,5
<b>Calcium (mg)</b>	140
<b>Sodium (mg)</b>	61
<b>Potassium (mg)</b>	204
<b>Magnésium (mg)</b>	13
<b>Phosphore (mg)</b>	112

La plupart des procédés de fabrication des yogourts repose sur une base commune : l'écémage, l'homogénéisation, la pasteurisation, la fortification, la fermentation, le refroidissement, l'emballage, le stockage et le transport du produit final. La Figure 1 montre la fabrication d'un yogourt traditionnel nature à partir de lait cru.



**Figure 1 : Procédé de production du yogourt conventionnel (non concentré)**

Source : adapté de (11)

- Écrémage

Cette étape consiste à séparer mécaniquement par force centrifuge les globules gras contenus dans le lait entier par différence de densité. A la sortie de la centrifugeuse il est obtenu d'un côté le lait écrémé et de l'autre la crème.

- Homogénéisation

Cette étape consiste à réduire le diamètre des globules gras par un traitement physique de pression dans un homogénéisateur à valves. L'application de ce traitement au lait destiné à la fabrication des yogourts permet une stabilisation plus importante du gel.

- Pasteurisation

Dans le but d'éliminer et d'inhiber les microorganismes pathogènes pouvant entrer en compétition avec les ferments lactiques, le lait écrémé subit un traitement thermique à 72°C pendant 15 secondes pour ensuite être refroidi rapidement à 4°C.

- Fortification

Industriellement afin d'augmenter la viscosité du produit final, une fortification du lait du départ en solides totaux non gras est effectué. Généralement de la poudre de lait écrémé est ajoutée jusqu'à une teneur totale en solides totaux de 12 à 15%. Dans ce projet, cette étape a été omise du procédé de fabrication du yogourt traditionnel, puisque ce yogourt est ultérieurement concentré par ultrafiltration.

- Traitement thermique

Le lait écrémé est soumis à un traitement de chauffage relativement élevé à 90°C et maintenu pendant 5 min (11). Ce traitement thermique considéré comme une étape essentielle dans le procédé de fabrication de yogourt vise à inactiver partiellement certaines enzymes présentes dans le lait, de détruire les agents pathogènes résistants à la chaleur, et de dénaturer 70-80 % des protéines du lactosérum, particulièrement les beta-lactoglobulines de façon irréversible afin d'améliorer la texture du produit final, en minimisant la synérèse par la formation d'un gel capable de retenir une grande quantité d'eau (17) (18).

- Inoculation et fermentation

Suivant le chauffage, le lait est refroidi à la température d'incubation située entre 40°C et 43°C. Par la suite, ce dernier est inoculé avec une culture mère contenant les ferments lactiques : *Streptococcus salivarius subsp. thermophilus* et *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus*. Le taux d'inoculation varie entre 0,5 à 5,0 % (12).

La température d'inoculation est maintenue et suivie tout au long du processus de fermentation pendant quelques heures (3 h à 5 h) jusqu'à l'atteinte d'un pH final d'environ 4,2 – 4,5, correspondant généralement à une teneur en acide lactique de 0,9 à 1,0 %.

Pendant la fermentation, deux composants, le lactose et les protéines, jouent un rôle important lors de la fabrication du yogourt. Le lactose apporte la source d'énergie pour les cultures lactiques, et les protéines sont les responsables de la formation du coagulum (11). L'interaction des bactéries entre elles favorisent leur croissance mutuelle, et transforment le lactose du lait en acide lactique. Cet acide lactique abaisse le pH du lait favorisant ainsi la déstructuration et la précipitation des caséines qui, combinées avec les sels de calcium, entraînent une déminéralisation importante en minéraux, notamment en calcium et phosphore (19), donnant comme résultat la coagulation du lait. Dans un yogourt conventionnel ces minéraux sont présents dans le lactosérum.

La production des composés volatils aromatiques a lieu pendant cette étape de fermentation lactique, et confèrent la saveur et l'arôme caractéristiques au yogourt (17).

- Refroidissement

Par la suite, lorsque le lait coagulé atteint une valeur de pH comprise entre 4,5 et 4,6, il est refroidi à une température inférieure à 20°C afin d'arrêter le processus de fermentation et d'empêcher ainsi l'augmentation de la concentration en acide lactique du produit (11). Finalement le produit est mis en pots et conservé à 10°C avant sa distribution.

## 1.4 Méthodes de production industrielle de yogourt grec

La méthode traditionnelle de concentration du yogourt par égouttage n'est pas compatible avec une fabrication à l'échelle industrielle. Cette méthode est lente, laborieuse, et surtout peut présenter certains problèmes sanitaires dus au temps d'égouttage trop long.

Il existe plusieurs méthodes de production de yogourt grec à échelle industrielle décrites dans les parties suivantes. Le choix du type de méthode mis en place dépend des réalités géographiques et économiques de chaque industrie (11).

### 1.4.1 Égouttage à l'aide de sacs en tissu

En suivant la méthode traditionnelle et sur le même principe de production du fromage frais français, la technique consiste à empiler, dans une chambre froide, plusieurs sacs remplis de yogourt dans une presse verticale afin évacuer le lactosérum (20). Le temps d'écoulement du lactosérum déterminera le contenu en solides totaux du produit final (12). En raison du temps nécessaire à la fabrication, cette méthode n'est utilisée seulement que pour des productions artisanales.

### 1.4.2 Concentration par centrifugation

La fabrication de yogourt grec à grande échelle utilise très souvent le système de séparation mécanique solide-liquide par centrifugation. Cette méthode utilisée déjà lors de la production des fromages à pâte molle, consiste à séparer par force centrifuge le lactosérum contenu dans le yogourt conventionnel jusqu'à l'obtention d'un yogourt plus dense. Il est possible de passer de 9% de solides totaux contenus dans le yogourt conventionnel à 18% de solides totaux dans le yogourt grec (12).

### 1.4.3 Ajout de solides du lait

La fortification du lait en solides totaux lors de la production de yogourt est une démarche assez courante permettant une augmentation de la consistance et de la viscosité du produit final. Cet ajout de solides au lait peut être effectué par différentes méthodes : la méthode traditionnelle consiste à faire bouillir le lait afin de réduire son volume et d'augmenter ainsi la concentration en solides totaux. À l'échelle industrielle, la technique d'ajout de lait en poudre entier ou écrémé est généralement utilisée. Lors de la fabrication de yogourt à 0% de matière grasse, le babeurre peut remplacer la poudre de lait grâce à sa composition similaire et à ses propriétés émulsifiantes.

Le développement des techniques de fractionnement des différents constituants du lait et du lactosérum rendent aujourd'hui disponible aux fabricants de yogourt un vaste nombre de produits dérivés du lait. Les caractéristiques fonctionnelles de ces produits jouent des rôles de rétenteur d'eau, gélifiant, moussant, émulsifiant, et les rendent adaptables à différents types de procédés de fabrication non seulement lors de la fabrication de yogourt, mais aussi de fromages, de suppléments nutritionnels, de boissons protéinées.

Ainsi la méthode de formulation de produit lors de la production de yogourt consiste à ajouter un concentré protéique de lait sous forme de poudre, préalablement à la fermentation, afin d'augmenter la teneur en solides du lait. Cet enrichissement est effectué avec l'utilisation des concentrés de protéines de lait (MPC), la poudre de lactosérum (WP) ou des mélanges de MPC et protéines de lactosérum concentré (WPC). Ces deux ingrédients laitiers contiennent des protéines de haute qualité obtenues à partir du lait (21).

Les MPC sont des protéines provenant du lait contenant de la caséine et des protéines de lactosérum (dans les mêmes proportions que le lait) (21). Elles sont généralement produites par ultrafiltration (22) (23).

Les MPC sont vendues généralement sous la forme de poudre. Comparées à la poudre de lait écrémé, les MPC contiennent une quantité élevée en protéines (de 42% à 85%). Les MPC permettent ainsi d'enrichir le lait lors de la production des yogourts grecs en ajoutant des protéines (22) (24).

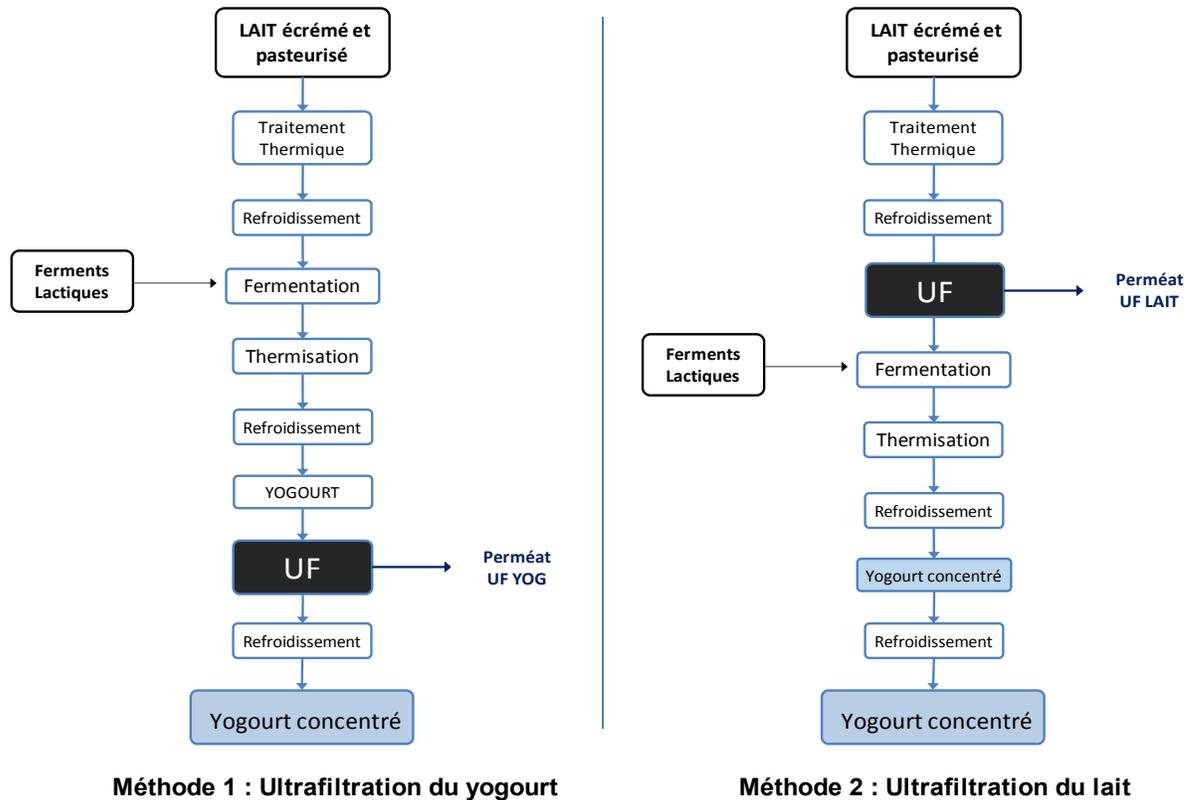
Cependant, lors de la production industrielle de yogourt grec cette méthode de formulation de produit résultait laborieuse et plus coûteuse comparée aux autres techniques de fabrication (25). Dans le marché actuel, cette méthode est préconisée par certains fournisseurs d'ingrédients tels que Arla Foods (26) évoquant la diminution du capital d'investissements en équipements et l'élimination de la production du lactosérum considéré comme un déchet lié à la production de yogourt grec par les autres méthodes.

#### 1.4.4 Concentration par ultrafiltration (UF)

Une autre méthode de fabrication de yogourt grec est la technique de concentration du yogourt conventionnel par UF. L'obtention de yogourt concentré par UF a été étudiée principalement dans les années 1980 (25). Deux méthodes différentes utilisant chacune le procédé d'UF sont utilisées pour l'élaboration d'un yogourt concentré (11) :

- La première approche consiste à concentrer directement le yogourt, élaboré de manière traditionnelle, par UF.
- la deuxième approche consiste à concentrer le lait par UF et réaliser l'étape de fermentation sur le lait concentré (rétentat d'ultrafiltration).

La Figure 2 détaille les deux méthodes de fabrication de yogourt grec par UF citées précédemment.



**Figure 2 : Procédés de production du yogourt concentré par UF à partir du lait écrémé et pasteurisé**

Source : adapté de (27)

La première méthode d'UF a été largement utilisée par les industries. Cependant, la deuxième méthode visant l'UF du lait avant l'étape de fermentation procure l'avantage de générer un perméat d'UF sans acide lactique et plus facilement valorisable que le lactosérum issu de l'UF du yogourt.

Une étape supplémentaire de thermisation visant d'arrêter la fermentation du lait est nécessaire lors du procédé d'obtention du yogourt concentré. Ce traitement thermique est appliqué sur le lait fermenté à 55°C pendant 5 min avant l'étape de concentration par UF (27).

Le Tableau 2 compare la composition globale des yogourts concentrés obtenus à partir de lait entier selon les différentes méthodes de fabrication citées précédemment.

**Tableau 2 : comparaison de la composition globale des yogourts concentrés (à partir de lait entier)**

Source : adapté de (11) (28)

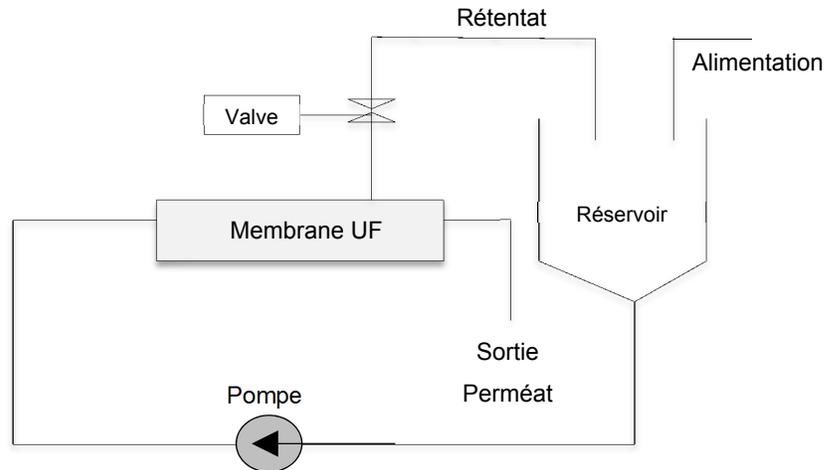
Méthode	Solides totaux (%)	Protéines (%)	Lactose (%)	Gras (%)	Cendres (%)
<b>Traditionnelle</b>	23,3	8,0	5,2	9,2	0,8
<b>UF du lait</b>	22,4	8,3	5,2	8,2	0,8
<b>UF du Yogourt</b>	22,6	8,1	5,5	8,5	0,9
<b>Ajout de solides du lait</b>	22,5	6,4	8,7	6,1	1,3

Ces données démontrent que les solides totaux et les protéines contenus dans les yogourts concentrés obtenus par la méthode traditionnelle et par UF sont similaires.

Ce projet étudiera les deux méthodes utilisant l'ultrafiltration avant et après fermentation pour la fabrication de yogourt grec. Dans le but de les rendre comparables, une étape de thermisation suite à la fermentation a été ajoutée à la méthode d'obtention par UF du lait. Ces deux méthodes seront développées plus en détail dans les parties suivantes.

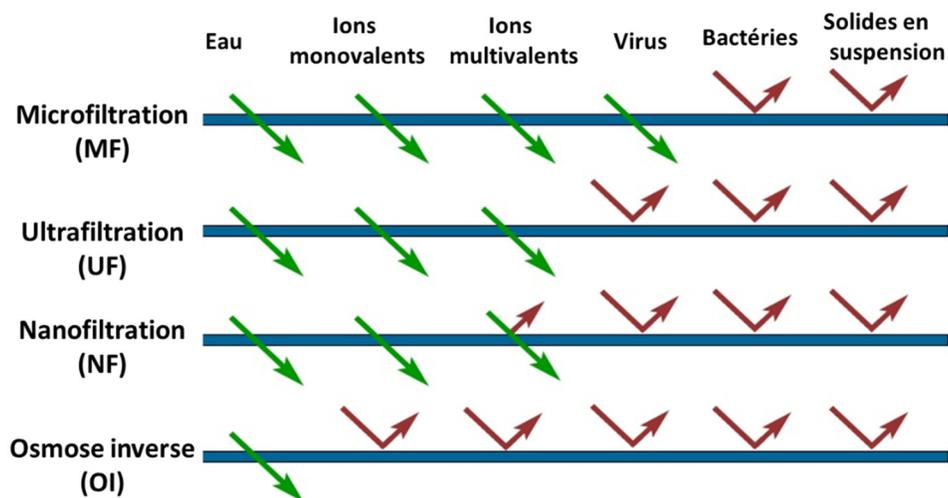
## 1.5 Procédés baromembranaires et ultrafiltration

Les techniques de filtration baromembranaires sont des procédés de séparation tangentiels, caractérisés par une faible consommation d'énergie, qui travaillent tous sur le même principe d'installation : Une unité de filtration simple comprend un réservoir d'alimentation, une membrane de filtration, une pompe d'alimentation, un échangeur de chaleur, une valve de restriction à l'entrée, une autre à la sortie et deux manomètres (29). Le mélange aqueux est pompé jusqu'à une membrane poreuse, qui sous l'effet d'une différence de pression transmembranaire permet de séparer, concentrer et même purifier des espèces dissoutes ou en suspension dans la solution (11). Lors de la filtration, les particules qui traversent la membrane sont récupérées dans le perméat alors que la fraction retenue par la membrane est récupérée dans le rétentat (18).



**Figure 3 : Présentation d'un système de filtration membranaire**

Il existe 4 procédés baromembranaires : la microfiltration (MF), l'ultrafiltration (UF), la nanofiltration (NF) et l'osmose inverse (OI) qui diffèrent selon le gradient de pression et la taille des pores membranaires. Comme le montre la figure 2, ces procédés permettent donc une séparation des molécules en fonction de leur taille : bactéries et particules en suspension pour MF, protéines solubles pour UF, lactose pour NF et minéraux monovalents (Na, K, Cl) pour OI (29). Ces techniques de filtration membranaire font partie des opérations unitaires courantes dans l'industrie alimentaire à travers le monde (29).



**Figure 4 : Comparaison des technologies baromembranaires**

Source : adapté de (30)

La technique d'ultrafiltration permet aux industries laitières de concentrer les protéines contenues dans le lait et le lactosérum. La première application du procédé d'ultrafiltration dans l'industrie laitière a été étudiée en 1969 par l'INRA<sup>1</sup>. Le résultat de cette recherche a donné lieu au brevet MMV portant sur l'emploi de cette technique en fabrication fromagère. L'application de cette méthode a permis aux industries fromagères de standardiser la composition du lait à transformer, de réduire les volumes à traiter, et d'avoir un meilleur rendement fromager (31).

Depuis, différentes applications de l'ultrafiltration dans l'industrie laitière ont été développées (32). L'ultrafiltration est principalement utilisée pour la valorisation du lactosérum issu de la fabrication fromagère. L'application de cette technique permet de récupérer le lactose et de concentrer les protéines sériques afin de générer des concentrés de protéines sériques.

L'ultrafiltration du lait permet aussi la production des concentrés de protéines totales du lait (MPC - Milk Protein Concentrate). Plus récemment, l'UF est utilisée pour la fabrication de produits laitiers concentrés. Cette partie est développée plus précisément dans la section 1.4.3.

Le choix de sélection des membranes UF est basé sur leur sélectivité, leur matériau et leur configuration. La sélectivité d'une membrane d'ultrafiltration se fait en fonction de son seuil de coupure (c'est-à-dire la masse molaire du plus petit composé qui sera retenu à 90 % par la membrane) qui est exprimé en (Da). Les membranes d'ultrafiltration présentent des tailles de pores comprises entre 0,01 µm et 0,1 µm (29), permettant la séparation des particules de poids moléculaire compris entre 10<sup>3</sup> à 10<sup>6</sup> daltons (Da) sous une pression d'opération de 0,1 à 0,5 MPa.

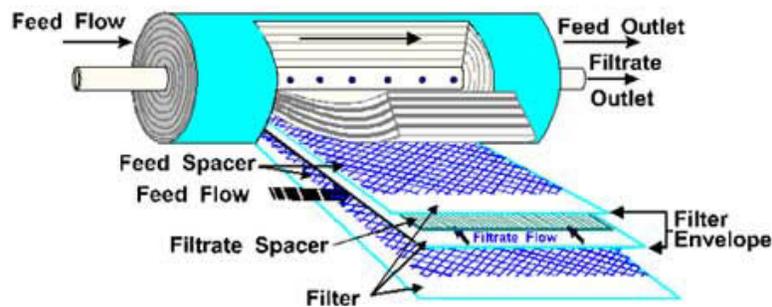
La plupart des membranes d'UF sont élaborées en matériaux polymères (principalement polyethersulfone et polysulfone) ce qui les rend à la fois résistantes et accessibles à faible coût. Les membranes d'UF sont disponibles en différentes configurations : modules plans, tubulaires, spiralés, et en fibres creuses. Les membranes de configuration tubulaire sont généralement mieux adaptées pour l'UF du yogourt (33). Cependant, des membranes d'ultrafiltration spiralées, moins dispendieuses que les membranes tubulaires, peuvent

---

<sup>1</sup> Institut National de la Recherche Agronomique

aussi répondre aux caractéristiques nécessaires pour la filtration des fluides complexes tels le yogourt (27).

Les essais d'UF menés en laboratoire dans le cadre de ce projet font appel à l'utilisation des membranes spiralées. Ces membranes sont composées d'un tube dans lequel s'écoulera le perméat (voir Figure 5). Autour de ce tube sont enroulés en couches successives une membrane et un espaceur, ou promoteur de turbulence. Celui-ci, pouvant avoir différentes formes géométriques, crée un espace entre deux couches de membrane et permet ainsi l'écoulement du fluide.



**Figure 5 : Module membrane spiralé**

**Source : adapté de (34)**

Un des défis auxquels les industries doivent faire face lors de l'utilisation des membranes d'UF est l'apparition à plus ou moins long terme d'un encrassement. La différence principale entre les membranes d'ultrafiltration pour la concentration du lait comparativement à la concentration du yogourt est la taille des espaceurs dans la structure de la membrane. Les espaceurs des membranes utilisées pour la fabrication de yogourt grec sont plus épais (80 mils<sup>2</sup> vs 42 mils) afin d'augmenter la turbulence (c'est-à-dire le mouvement du fluide à l'interface membranaire) dans le système et diminuent théoriquement ainsi le problème d'encrassement (27).

---

<sup>2</sup> Le mil est une unité de mesure de longueur, égale à un millième de pouce, soit exactement 25,4 micromètres.

Les caractéristiques membranaires (seuil de coupure, matériau), les conditions hydrodynamiques appliquées lors de la séparation (pression transmembranaire) ainsi que la température de filtration sont aussi des critères importants permettant de minimiser l'obstruction de ces pores et donc une diminution du flux de perméation et de sélectivité au cours du procédé (18). Par conséquent, le Tableau 3 présente les différentes variables d'importance à prendre en considération lors de l'étape d'UF (35) (18) (29) (36).

**Tableau 3 : Variables opérationnelles lors du procédé d'ultrafiltration**

<p><b>Pression transmembranaire</b> (<math>P_{tm}</math>)</p> $P_{tm} = \frac{P1 + P2}{2} - P3$ <p><b>P1</b> = pression à l'entrée de la membrane (en kPa ou en PSI)  <b>P2</b> = pression à la sortie de la membrane (en kPa ou en PSI)  <b>P3</b> = pression du côté perméat (en kPa ou en PSI)</p>	<p>C'est la force motrice qui va permettre le passage du fluide à traiter à travers la membrane de filtration. C'est la pression moyenne en tenant en compte de la perte de charge due à l'écoulement transmembranaire.</p> <p>Elle est définie comme la différence de pression appliquée de part et d'autre de la membrane, entre le côté d'entrée du liquide et le côté perméat.</p> <p>La pression transmembranaire est directement proportionnelle au flux de perméation. Pour l'eau pure, cette relation est linéaire. Pour les fluides plus complexes, comme le lait et le yogourt la courbe de flux de perméation en fonction de la pression transmembranaire s'infléchit et le flux devient indépendant de la pression transmembranaire. Il est donc important de déterminer la relation flux de pression transmembranaire (29) afin de déterminer les paramètres optimaux de filtration. En effet, une pression transmembranaire trop élevée engendre rapidement la formation d'un dépôt à la surface de la membrane appelé phénomène d'encrassement.</p>
---	--

<p><b>Facteur de Concentration volumique (FCV)</b></p> $FCV = \frac{V_0}{V_f}$ <p><math>V_0</math> = volume ou poids initial de la solution (en L ou en kg)  <math>V_f</math> = volume ou poids final de rétentat obtenu (en L ou en kg)</p>	<p>C'est une grandeur sans dimension permettant de définir le volume du lait ou de yogourt qui va être concentré. La FCV est définie comme le rapport entre le volume du fluide initial à traiter et du volume de rétentat généré.</p>
<p><b>Température (T)</b></p>	<p>La température joue un rôle important sur le flux de perméation (J) car elle réduit la viscosité et augmente la perméabilité de la membrane. Il est important de définir préalablement la température d'opération, choisie en fonction des caractéristiques du liquide à traiter (lait ou yogourt). Industriellement, afin de limiter la croissance microbienne, les procédés de filtration sont effectués à des températures comprises entre 45-50°C. Un suivi et un contrôle de la température au cours du procédé d'UF permet différencier si une chute du flux du perméat est causé par une baisse de température, ou par un autre paramètre comme un changement de la pression transmembranaire.</p>

**Tableau 4 : Paramètres à optimiser lors du procédé d'ultrafiltration**

<p><b>Flux de perméation (J)</b></p> $J = \frac{V_p}{A}$ <p><b>J</b> = flux de perméation (en L/h.m<sup>2</sup>)  <b>V<sub>p</sub></b> = débit d'écoulement du perméat (en L/h)  <b>A</b> = surface de la membrane (en m<sup>2</sup>)</p>	<p>C'est une quantification de la performance du système, définie comme le débit volumique de perméat par unité de surface membranaire. Il est généralement exprimé en litres par heure et par mètre carré de membrane.</p> <p>Le flux de perméation dépend directement des propriétés du liquide à traiter (la concentration en solides totaux, viscosité, température) et des conditions d'opération (pression, FCV, etc...). Il est proportionnel à la pression transmembranaire.</p> <p>Le flux à l'eau est une caractéristique de la membrane qui est généralement indiqué par le fournisseur et renseigne sur la résistance hydraulique de la membrane neuve.</p>
<p><b>Vitesse de circulation</b></p> $V = \frac{Q}{3600 \times S}$ <p><b>V</b> = vitesse de circulation (m.s<sup>-1</sup>)  <b>Q</b> = débit volumique (m<sup>3</sup>/h)  <b>S</b> = surface membranaire (m<sup>2</sup>)</p>	<p>C'est l'écoulement tangentiel à la surface de la membrane définit comme le débit volumique instantané par unité de surface (de la section d'écoulement tangentiel)</p> <p>Une vitesse de circulation élevée permet de réduire le colmatage et aura un effet positif sur les flux de perméation, du fait que l'augmentation du mouvement tangentiel de l'alimentation accélère le transport des particules tendant à s'accumuler sur la surface de la membrane (37)</p>

## 1.6 Ultrafiltration du lait écrémé pour la fabrication du yogourt grec

Le lait est constitué de trois phases : la phase lipidique contenant les globules de gras, la phase protéique (caséines) et minérale à l'état colloïdal et une phase aqueuse contenant du lactose, des protéines solubles (protéines sériques) des minéraux et des vitamines. La teneur du lait en protéines varie entre 3,0 à 3,5 %. Celles-ci sont classifiées selon leur solubilité par modification du pH : 80% des protéines sont représentées par les caséines

et son insolubles à pH 4,6, les 20% restant sont les protéines du lactosérum et sont solubles à pH 4,6 (18).

L'UF du lait écrémé produit un rétentat riche en protéines (caséines et protéines de lactosérum) et un perméat d'UF constitué principalement d'eau, de lactose, de minéraux et de vitamines (12). Ce perméat d'UF présente un pH compris entre 5 et 6,3, comparable au lactosérum doux généré suite à la fabrication des certains fromages (ex : fromages à pâtes pressées), à la différence que le perméat d'UF ne contient pas de protéines. La faible acidité de ce coproduit facilite la valorisation de certains composants présents comment le lactose.

Lors de la fabrication du yogourt par UF du lait écrémé, la concentration du lait est réalisée jusqu'à l'obtention de la teneur en solides totaux désirée entre 12 à 15% dans le produit final. Le pourcentage en protéines peut atteindre 10 % (38). Ensuite, le rétentat obtenu subit les étapes classiques de fabrication de yogourt décrites dans la section 1.3.

On peut considérer que le procédé de fabrication de yogourt à partir de lait concentré est similaire à celui du fromage à pâte molle. Dans l'étape d'ultrafiltration du lait destiné à la fabrication de fromages à pâte molle, le lait est concentré à 20 % de son volume initial, donc un facteur de concentration volumique (FCV) de l'ordre de 5, générant un rétentat avec un taux de matière sèche proche de celui du fromage final, appelé « pré-fromage-liquide » (39). Ensuite les caséines présentes dans ce rétentat sont coagulées par l'action acidifiante d'ajout de présure. Lors de la fabrication du yogourt, tel que mentionné dans la partie 1.3, l'action des bactéries lactiques modifie le pH du lait et entraîne la formation du gel.

Il est important de tenir en compte que la concentration du lait écrémé par ultrafiltration entraîne des modifications physicochimiques importantes dans le rétentat. Ces modifications ont des conséquences importantes lors de l'étape de fermentation. La concentration des minéraux augmente aussi avec celle des protéines. Ainsi, une concentration du phosphate et du calcium associé aux caséines produit une augmentation du pouvoir tampon du rétentat. Cela implique que la durée de fermentation devient plus longue en passant de 3h pour le lait non concentré à 5h pour le lait concentré (40), et un pH plus élevé dans le produit final par rapport à un yogourt fabriqué avec du lait non concentré.

De plus, la perte en lactose dans le perméat d'ultrafiltration fait que la concentration de ferments à inoculer est généralement plus importante (35).

La qualité sensorielle du produit final dépend du type du lait utilisé, de l'interaction de entre la culture lactique et le pourcentage de solides totaux contenu dans le rétentat (41) (42). Une concentration du 12% solides totaux donnera la texture, la flaveur et les autres attributs sensoriels souhaités dans un yogourt concentré (43).

Lors du procédé d'ultrafiltration du lait écrémé ce sont les protéines et partiellement les minéraux qui sont responsables de l'encrassement des pores de la membrane (44). Le choix de température d'opération est important afin d'éviter qu'une température élevée provoque une hydratation des micelles de caséines et donc une libération du calcium et du phosphore. L'ultrafiltration du lait écrémé à 50°C augmente le flux de perméation et diminue la rétention des molécules à faible poids (38).

## 1.7 Ultrafiltration du yogourt

La production de yogourt concentré par UF du yogourt est une des alternatives de production à l'échelle industrielle du yogourt grec, car elle facilite particulièrement la production en ligne. C'est pourquoi les industriels choisissent cette méthode. L'UF de ce lait fermenté permet d'obtenir un produit ayant des caractéristiques rhéologiques et une concentration de cultures lactiques actives similaires au yogourt concentré par l'égouttage au travers des sacs en tissus (45).

Pendant l'UF du lait fermenté, dû à l'acidité ( $\text{pH} \approx 4,5$ ), une partie des protéines solubles du lait traversent la membrane et se retrouvent dans le perméat. Le rétentat obtenu présente donc une diminution de sa concentration en protéines. De même, les minéraux présents dans le lactosérum du lait fermenté se retrouvent dans le perméat suite au processus d'ultrafiltration. Cela donne comme résultat un yogourt concentré final présentant, pour un même pH, un goût moins acide comparé au yogourt produit par UF du lait non fermenté (46).

Afin d'éviter une diminution de la performance de la membrane par encrassement dû à la viscosité du yogourt, la température d'opération pendant l'UF doit être effectuée dans un intervalle compris entre 40 et 45°C (45) (11) (27). Ce choix de cette température a pour

effet de réduire la viscosité du lait fermenté et d'assurer la survie des ferments lactiques. Ceux-ci supportent des températures de plus de 45°C (voire 60°C pendant 30 minutes pour *Streptococcus salivarius subsp. Thermophilus* (12)).

Le facteur de concentration volumique (FCV) lors de l'UF du yogourt est déterminé de façon à obtenir environ 15% de solides totaux, dont 10% de protéines, dans le yogourt concentré final (47).

## 1.8 Impact environnemental de la production de yogourt concentré

La fabrication du yogourt concentré par les 2 procédés d'ultrafiltration décrit précédemment génère deux types de perméat. Le perméat dit « doux » est produit lors du procédé d'UF du lait avant fermentation. Le perméat « acide » est obtenu lors du procédé d'UF du lait après fermentation.

Le perméat «doux» est composé d'eau, de lactose, de minéraux et de vitamines (11), il est aujourd'hui valorisé de la même façon que le lactosérum généré dans la fabrication fromagère.

Le perméat « acide », malgré le peu d'information disponible sur sa composition exacte, est constitué majoritairement d'eau (environ 95%). La matière sèche (5%) est constituée de lactose (87%), de sels minéraux (ions calcium, magnésium, phosphore, potassium, sodium, chlorure), d'acide lactique (issu de la transformation du lactose par les bactéries lactiques) et d'une quantité non significative de protéines.

Par sa composition, le perméat acide représente une problématique environnementale majeure à plusieurs niveaux. Tout d'abord, sa faible teneur en protéines ne permet qu'une utilisation limitée en alimentation animale comparativement au perméat doux issu de la transformation fromagère. De plus, la présence de lactose (augmentant la demande biologique en oxygène du produit) ne permet pas un épandage de volumes importants dans les cultures agricoles. Par la suite, son pH acide et sa teneur élevée en minéraux rend difficile l'évaporation et le séchage normalement pratiqués pour préparer la poudre de perméat doux (48). Et d'un autre côté la présence des minéraux et des métabolites des bactéries lactiques, suite à la fermentation (49), rend difficile la cristallisation du lactose (44).

Par conséquent, les possibilités de valorisation de ce coproduit acide sont restreintes, d'autant plus que les volumes générés sont extrêmement importants, représentant les 2/3 du volume initial du lait mis en œuvre (50).

Les industries laitières sont donc actuellement confrontées à la dualité d'une part du fait que le yogourt grec permet de générer un profit important, et d'autre part, que sa fabrication est associée à l'impact environnemental relié à la problématique de gestion des déchets (2) (4). Une mise en place d'actions contribuant à améliorer la situation s'avère nécessaire. Différentes alternatives technologiques ont été récemment proposées permettant d'éviter la production du perméat acide. Mais certaines comme l'épandage de ce coproduit sur les champs représente un coût supplémentaire pour le fabricant. D'autres proposent sa neutralisation et concentration par osmose inverse pour ensuite être utilisé comme additif alimentaire (67) ou l'utilisation de l'enzyme microbienne pour l'hydrolyse du lactose afin de générer des galactooligosaccharides. Cependant, l'option idéale consisterait à produire un yogourt grec sans lactosérum acide. Ceci peut être réalisé par un enrichissement en protéines du yogourt traditionnel en utilisant des protéines de lait ou des concentrés de caséine micellaire (partie 1.4.3) Une autre stratégie consiste à concentrer le lait par UF (avant fermentation) pour obtenir un rétentat de lait ultrafiltré qui sera ensuite fermenté afin d'obtenir un yogourt enrichi en protéines (partie 1.4.4). Cette option permet de retirer un perméat « doux », non fermenté, déprotéiné et donc plus facilement valorisable.

Cependant, aucune donnée comparant les deux procédés de fabrication (UF avant ou après fermentation) de yogourt grec n'existe à cet effet dans la littérature scientifique.

Ce projet vise à évaluer et à comparer les impacts environnementaux potentiels de ces deux pour l'obtention des yogourts concentré de référence. Ces caractérisations seront réalisées à l'aide de l'outil d'aide à la décision Analyse de Cycle de Vie (ACV) décrit dans le paragraphe suivant.

## 1.9 Mesure de l'empreinte environnementale

C'est en 1972 que les précurseurs de la notion de développement durable informaient sur l'urgence de réévaluer le modèle de développement établi jusqu'alors. Ces chercheurs du Massachusetts Institute of Technology (MIT) ont mis au point un modèle de simulation pour conclure que les ressources offertes par la planète terre sont limitées.

En 1992, lors du sommet de la Terre à Rio, l'Organisation des Nations Unies (ONU) réunissait pour la première fois les gouvernements et représentants du secteur public et privé du monde entier à se concerter et à s'engager à mettre en place des politiques d'action autour de l'idée d'un « développement durable ». Ce modèle de développement repose non seulement sur l'économie, mais aussi sur les enjeux environnementaux et sociaux du monde actuel et de celui à venir.

Aujourd'hui, 40 ans après, le développement durable est toujours d'actualité. Les acteurs du monde actuel prennent graduellement conscience que le modèle traditionnel finira par épuiser les matières premières qu'il exploite, voire affecter la résilience des écosystèmes de la planète terre. Dans cette optique, de nombreux outils ont été développés afin d'encourager et accompagner les industries à prendre des décisions éclairées dans une démarche en développement durable, notamment, la méthodologie d'analyse de cycle de vie ou ACV.

#### 1.9.1 La méthodologie d'analyse de cycle de vie (ACV)

L'ACV est un outil d'évaluation permettant de mesurer les ressources nécessaires pour élaborer un « produit » (un bien, un service ou un procédé), et de quantifier les impacts environnementaux directs et indirects de ce produit tout au long de son cycle de vie (51).

L'ACV est un outil incontournable pour supporter les démarches de développement durable sur l'aspect de la mesure de l'empreinte environnementale. Il s'agit d'une approche qui évalue les impacts du cycle de vie d'un produit, procédé ou service depuis l'extraction des matières premières, la fabrication, l'utilisation, et la gestion de fin de vie par rapport à la fonction fournie (ou service rendu) (52). (53).

La procédure pour la mise en place d'une ACV est décrite dans la norme ISO 14040 qui établit les principes et le cadre, et la norme ISO 14044 qui précise les exigences relatives à l'ACV et les lignes directrices pour sa réalisation. (54)

La démarche d'ACV sert comme outil d'aide lors de la prise de décisions environnementales pour les industries. Celles-ci peuvent mettre en place une démarche d'ACV dans un ou différents procédés de fabrication afin d'obtenir une vision globale des enjeux liés au produit. Cette démarche permet ainsi d'identifier les points critiques et de déterminer les étapes de fabrication qui pourront être améliorées (52). Par ailleurs, afin

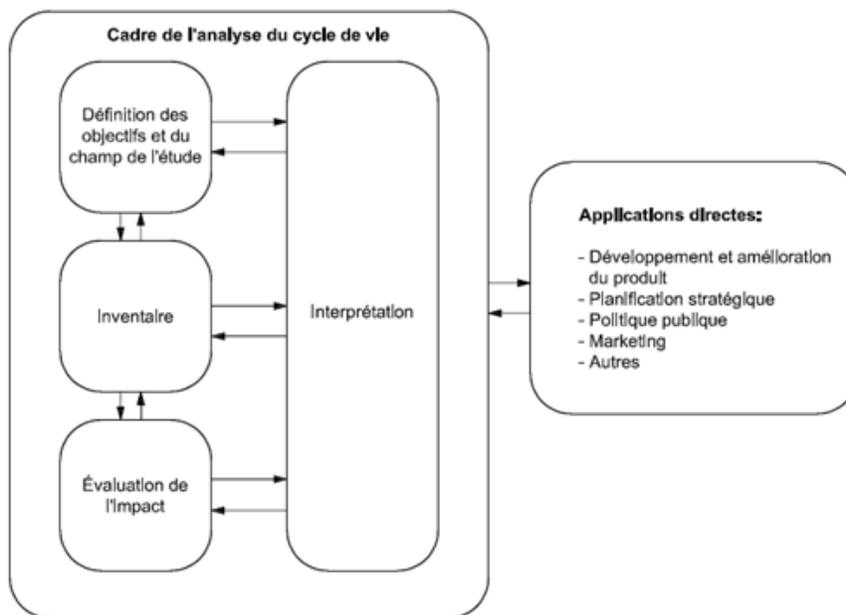
d'éviter de tomber dans le piège de déplacer un problème ailleurs dans la chaîne de production, les industries peuvent comparer les impacts environnementaux des différents procédés de fabrication d'un même produit. (55).

De façon résumée, la réalisation d'une ACV consiste à définir les objectifs et le modèle d'étude, effectuer un inventaire des flux entrants et sortants de matière et d'énergie de chaque produit étudié, appelé analyse de l'Inventaire du Cycle de Vie (ICV), réaliser une évaluation des impacts du cycle de vie (EICV) et interpréter les résultats. Lors de l'étape ÉICV : les données de l'ICV sont transformées dans une série d'impacts environnementaux. En fonction de la méthode utilisée, les impacts sont agrégés dans des catégories d'impacts tels que la santé humaine, les ressources, le changement climatique, la qualité des écosystèmes. Les résultats de l'ACV, de la même manière que le reste de l'analyse, repose sur une Unité Fonctionnelle (UF), préalablement établie lors de la définition des objectifs de l'étude. L'UF est un élément de mesure, permettant d'effectuer des comparaisons en quantifiant la fonction remplie par le produit. (56)

Il existe deux façons principales d'effectuer un ACV. La méthode attributionnelle vise, comme son nom l'indique, à attribuer à un système de produits les impacts qui lui sont imputables. C'est une photographie à un moment donné qui ne tient compte que des flux physiques échangés au cours du cycle de vie entre processus unitaires nécessaires à la réalisation de la fonction. (57). La deuxième approche, dite conséquentielle, vise à étudier les conséquences d'un changement sur l'ensemble des processus en lien avec le système à l'étude. Cette dernière approche permet de décrire les impacts d'une prise de décision par exemple des choix technologiques à l'échelle industrielle (52).

La qualité des données lors de la réalisation d'une ACV est essentielle et doit être cohérente avec les objectifs de l'étude (58).

La Figure 6 montre les 4 étapes de la méthodologie ACV, décrites dans la section suivante (54) (52).



**Figure 6 : Méthodologie de l'ACV selon la norme ISO 14040**

### ***Étape 1 : Définition des objectifs et du champ de l'étude***

Ce point permet de clarifier pour qui et pourquoi on réalise l'étude (Objectifs) et déterminer comment on le réalise (champ d'études), c.-à-d. on définit le système étudié ainsi que sa fonction et unité fonctionnelle, les règles d'allocation, le choix des bases de données et des méthodologies d'impact, les hypothèses de modélisation, etc. L'unité fonctionnelle (UF) sert de référence quantitative, permettant de comparer le service rendu par le produit du système.

### ***Étape 2 : Inventaire des émissions et des extractions***

Cette étape permet de réaliser l'inventaire (ICV) en identifiant et en quantifiant les flux des flux entrants et sortants du système de produits sur l'ensemble du cycle de vie du système étudié : extraction de matières premières, émissions dans l'air, l'eau, le sol, production, de sous-produits, etc. Un ICV se calcule combinant des données dites primaires (spécifiques au système d'étude), exprimant des flux intermédiaires mis à l'échelle de l'UF, et combinés avec des bases de données dites génériques, qui fournissent un inventaire ICV sur l'ensemble des chaînes d'approvisionnement associé à chacun des flux intermédiaires.

### ***Étape 3 : Évaluation des impacts sur l'environnement à partir de l'ICV***

L'objectif de cette étape consiste à caractériser, via une méthode de modélisation mathématique chaque flux élémentaire de l'ICV en scores d'impact environnemental regroupés par catégorie d'impact. Cette étape propose aussi des étapes optionnelles de normalisation, de groupement et de pondération (52).

Il existe de nombreux logiciels contenant des bases de données d'inventaire de base permettent de classer et de caractériser les impacts selon un certain nombre de méthodologies d'évaluation d'impact, tels que SimaPro, Umberto, GaBi et Eco-Bat (59).

### ***Étape 4 : Interprétation des résultats***

Dans le contexte itératif et d'amélioration continue d'une ACV, l'interprétation des données d'inventaire et les résultats de l'évaluation des impacts doivent être validés tout au long du processus afin de répondre aux objectifs de l'étude. L'analyse des résultats obtenus permet d'établir des conclusions, d'identifier les points critiques du système sur lesquels une amélioration est envisagée, et d'expliquer les limites de l'évaluation. Cette étape permet aussi de valider la robustesse des conclusions de l'étude à travers des analyses de sensibilité afin de déterminer l'influence des hypothèses, des données ou de la méthodologie mise en place sur ceux-ci.

#### **1.9.2 Base de donnée Québécoise d'Inventaire de Cycle de Vie (BD - ICV)**

Les bases de données d'inventaire de cycle de vie (BD - ICV) sont des fichiers de données créés par des groupes de professionnels sur les impacts environnementaux des matériaux et des procédés, spécifiques à leur spécialisation. Ces BD - ICV, provenant de différentes spécialisations sont rassemblées et mises à disposition de façon publique ou privée aux personnes chargées d'effectuer des Analyses de Cycle de Vie (56). Les BD - ICV sont généralement incluses dans les logiciels d'ACV. Il existe plusieurs BD - ICV généralement spécifiques à une zone géographique (Europe, Amérique du Nord, etc.) ainsi que les logiciels qui leur sont liés. Par exemple, Écoinvent est une base de données européenne, leader sur le plan mondial. Cette base de données documente des processus pour des milliers de produits, actualisée et mise à jour par regroupements pour chaque spécialisation (industrie chimique, agroalimentaire, électronique, etc.) (60).

Depuis novembre 2014, il existe une base de données québécoise d'inventaire du cycle de vie BD - ICV, résultat d'un projet mené par le CIRAI<sup>3</sup> et financé par le gouvernement du Québec (61). L'avantage principal de cette base de données est l'accès aux données concernant l'empreinte carbone de la production d'électricité au Québec par l'hydroélectricité, ce qui donne un profil environnemental favorable à certains produits québécois par rapport aux autres produits disponibles dans le reste du Monde. Les données de cette BD-ICV sont incluses dans la dernière mise à jour du logiciel Ecoinvent 3.1 (62) (63).

Lorsqu'une étude d'ACV débute, la collecte des données est idéalement effectuée par un registre de données directement dans le site industriel. Mais généralement cette quête est réalisée par recompilations de recherches bibliographiques et par une mise en perspective à partir de résultats précédents. Ces données spécifiques au produit étudié sont ensuite complétées par des données de la BD - ICV déjà existantes (56).

### 1.9.3 Processus multifonctionnels : procédures d'allocation

Les produits manufacturiers sont des systèmes à produits multiples, ce qui pose un problème lors de l'évaluation environnementale de l'ACV dans laquelle on ne s'intéresse qu'à un seul produit. La norme ISO 14040 propose d'allouer l'utilisation de certaines matières premières et charges environnementales entre le produit analysé et ses coproduits. Des règles d'allocation sont définies selon le type de système et la nature du produit étudié. (54; 52)

Il est important de faire la distinction entre coproduit et sous-produit. Un « coproduit » est un produit secondaire présentant une valeur économique, alors qu'un « sous-produit » est un résidu qui n'a aucune valeur économique et qui parfois nécessite un traitement.

- *Procédure d'allocation selon la norme ISO 14040*

La norme ISO 14040 décrit la hiérarchie des méthodes d'allocation suivantes.

Étape 1 : Quand c'est possible, l'allocation doit être évitée en :

---

<sup>3</sup> CIRAI<sup>3</sup> : Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services

- a) divisant le système de processus entre deux ou plusieurs sous-processus ; effectuant la collecte des données entrantes et sortantes relatives à ces sous-processus. Si la division n'est pas possible alors,
- b) effectuer une expansion du système en incluant les fonctions additionnelles des coproduits.

Étape 2 : Quand l'allocation ne peut pas être évitée, les entrants et les sortants du système doivent être fractionnés entre les différents produits ou fonctions des produits en prenant en compte les produits dérivés selon la causalité physique ou suivant une propriété représentant la causalité physique.

Étape 3 : Quand la relation physique ne peut pas être évitée, les entrants doivent être alloués entre les produits et les fonctions de manière à refléter la relation entre eux, par exemple, en effectuant une allocation économique ou fonctionnelle entre les coproduits.

- *Allocation lors de la transformation des produits laitiers selon IDF*

Le procédé de transformation du lait est un système à produits multiples. Par exemple, suite à l'opération d'écémage, deux produits sont obtenus : le lait écrémé et la crème.

Dans le but d'effectuer une ACV d'un seul produit, la collecte des données pour chaque opération unitaire qui lui est liée représente une problématique. D'une part l'utilisation des ressources est disponible sur l'ensemble de l'usine de transformation, et d'un autre côté, plusieurs opérations unitaires telles que la moyenne du lait, la pasteurisation, l'écémage sont très souvent partagées pour différents produits. De ce fait, afin de pouvoir réaliser une ACV d'un produit laitier, il est nécessaire d'identifier les entrants et les sortants du produit sélectionné. En ce qui concerne le lait comme matière première, la recommandation est d'allouer la consommation de lait cru et le transport sur la base des solides du lait du produit final. Pour les autres entrants et sortants, tels que l'électricité, des facteurs de répartition devraient être appliqués (64).

Les trois scénarios possibles sont :

- a) lorsque les données des procédés et des coproduits sont disponibles : l'énergie et l'utilisation des matériaux ainsi que les émissions peuvent être directement allouées aux produits spécifiques ;
- b) lorsqu'un mélange de données de processus détaillés et de coproduits, ainsi que l'ensemble des données d'usine sont disponibles, il faudra attribuer les données de procédés et de coproduits à des produits spécifiques d'abord, puis soustraire ces données

des données de l'ensemble de l'usine, puis allouer les produits restant sur la base de solides du lait.

c) lorsque seulement les données de l'ensemble de l'usine sont à portée de main : appliquer des coefficients de répartition issus d'une matrice d'allocation physico-chimique propre à l'industrie pour permettre une meilleure allocation des ressources aux produits laitiers en utilisant l'ensemble des informations de l'usine (65).

#### 1.9.4 Évaluation d'impacts : description des catégories d'impacts selon la méthode IMPACT 2002+

Il existe deux types d'approches pour caractériser les inventaires du cycle de vie :

- Les approches « orientées problème » (mid-point) :  
Les indicateurs d'impact sont définis au milieu de la chaîne de causalité. Cette méthode analyse les effets globaux des flux de substances entrants ou sortants, en prenant aussi en compte une partie de l'impact environnemental. Les résultats sont communiqués par exemple par écotoxicité aquatique, occupation des territoires, troubles respiratoires...
- Les approches « orientées dommage » (end-point) :  
Les indicateurs d'impact sont définis à la fin de la chaîne de causalité, et la méthode caractérise les dommages potentiels par une modélisation des chaînes cause à effet de plusieurs catégories intermédiaires vers une catégorie de dommages avec les mêmes unités.

La méthode IMPACT 2002+ (66) permet, par exemple, de regrouper des indicateurs d'impacts environnementaux dans quatre catégories de dommages :

- Santé humaine / Human health  
Ce facteur de dommage permet de passer de la quantité de produits aux années équivalentes de vie perdue, et est noté en *DALY/kg (disability adjusted life years)*;
- Qualité des écosystèmes / Ecosystem quality  
Ce dommage indique la fraction d'espèces potentiellement disparues sur une surface donnée par an : *PDF\*m<sup>2</sup>\*an (Potentially Disappeared Fraction)*;

- Changement climatique / Climate change

Ce dommage mesure l'émission de CO<sub>2</sub> : *kg de CO<sub>2</sub> équivalent*;

- Ressources / Resources:

Ce dommage représente la diminution des ressources non-renouvelables, exprimée en *MJ*.

L'outil d'évaluation environnementale Analyse de Cycle de Vie décrit dans cette section permettra donc de caractériser et de comparer les impacts environnementaux de la fabrication de yogourts grecs par deux méthodes de fabrication différentes, chacune utilisant l'ultrafiltration comme procédé de concentration. Dans ce contexte, des expériences à échelle pilote seront réalisées afin de comparer les deux procédés en termes d'utilisation d'eau, de consommation d'énergie et de production de co-produits. Ces données primaires seront complétées par des données d'inventaire québécoises de cycle de vie afin d'effectuer une ACV du berceau au tombeau. Le profil de l'impact environnemental sera évalué selon la méthodologie IMPACT World+.

## Chapitre 2. Hypothèse de recherche et objectifs

Ce projet vise à caractériser les impacts environnementaux potentiels de la fabrication à échelle pilote de yogourt grec selon deux méthodes de concentration utilisant l'ultrafiltration : la première méthode, UF du yogourt (après fermentation) et la deuxième, UF du lait (avant fermentation). Une évaluation, comparaison et conclusion quant à l'impact environnemental de ces deux procédés sera réalisée à l'aide de la méthode d'ACV.

### 2.1 Hypothèse

L'utilisation du procédé d'ultrafiltration avant l'étape de fermentation pour l'élaboration d'un yogourt grec permet une réduction des impacts environnementaux comparativement à la méthode conventionnelle visant à ultrafiltrer un lait fermenté.

### 2.2 Objectifs

- Produire deux yogourts concentrés de référence à l'échelle pilote en utilisant le procédé d'ultrafiltration avant [UF LAIT] et après fermentation du lait [UF YOG].
- Caractériser l'impact des choix technologiques d'UF sur l'utilisation de tous les constituants du lait, et réaliser l'inventaire des flux de matière et d'énergie pour les deux procédés.
- Évaluer, comparer et interpréter les impacts environnementaux des deux méthodes de fabrication par la méthode d'ACV.

## Chapitre 3. Effect of performing ultrafiltration on milk prior to fermentation on mass balance and process efficiency of greek-style yogurt manufacture

Paredes Valencia, A.<sup>1</sup>, Doyen, A.<sup>1</sup>, Pouliot, Y.<sup>1</sup>

1. STELA Dairy Research Center, Institute of Nutrition and Functional Foods, Department of Food Sciences, Laval University, Quebec (Canada)

### 3.1 Abstract

Ultrafiltration (UF) can be used to concentrate yogurt to produce Greek-style yogurt (GSY) (UF-YOG) but generates acid whey permeate which represents an environmental issue. However, when UF is applied before fermentation (UF-MILK), a classical whey permeate is generated. Two model GSYs were produced and GSY composition, UF performance and energy consumption between UF-YOG and UF-MILK processes were compared. For UF-MILK, skim milk was ultrafiltered with a 30-kDa spiral wound UF membrane until a 3X volume reduction factor (VRF). Retentate was fermented until pH 4.5. UF-YOG process was the same except that regular yogurt was ultrafiltered. Membrane spacer thicknesses were 46 and 80 mils for milk and yogurt, respectively. Both GSY had similar protein (~10%) and solid content (~17%). As expected, lactic acid was not detected in UF-MILK permeate while 7.3 g/kg was recovered in UF-YOG permeate. Highest permeation flux was obtained for UF-MILK but permeation flux decrease for UF-MILK was 50% while values for UF-YOG were ranged from 18 to 43% since UF membrane performance was never recovered even if drastic and repeated cleaning steps were applied. Energy consumption was 0.085 kWh/kg GSY for UF-MILK and ranged from 0.06 to 0.1 kWh/kg GSY for UF-YOG. Our results show that although the composition of GSY from both process was similar, UF step yogurt concentration affected process efficiency due to drastic and permanent membrane fouling.

### 3.2 Introduction

Greek-style yogurt (GSY) is currently the largest growing sector in the dairy industry. This commercial success is explained by its texture and organoleptic characteristics as well as

its nutritional benefits (high protein and low fat content). Traditionally, GSY production has been accomplished by straining regular yogurt through cheesecloth to reach the desired solids level (11). Nowadays, dairy industries mainly use centrifugation (CF), ultrafiltration (UF), a membrane separation technology driven by a pressure gradient of the milk base to increase milk solid content (12). However, these technologies induced the production of large quantities of acid whey which represents about two-thirds of initial milk processed (4) (2). Contrary to acid whey recovered after production of acid-coagulated dairy products (fresh cheeses and cream cheese), little specific information is available regarding GSY acid whey composition except that this waste is mainly composed of water (~94%), lactose (~5%), mineral (potassium, phosphorous and sodium) and lactic acid generated during the fermentation of milk. GSY acid whey valorization represents a challenge since it cannot be discharged to surface water due to the high COD and BOD. Moreover, its low protein concentration limits the use in human or animal feed. Finally, the high mineral and lactic acid content had a negative impact on lactose crystallization and quality (49).

Consequently, this waste management is an actual problematic for the dairy industry and created a controversy over the ethics of making products in terms of environmental issues and economic cost. Except its spread on farm fields after mixing with manure, which represents a cost for GSY manufacturer, different options were recently proposed to improve GSY acid whey valorization such as its neutralization and concentration by reverse osmosis for use as a food additive (67) or the use of microbial enzymes for lactose hydrolysis in order to generate galactooligosaccharides. However, the ideal option consists to produce a GSY without acid whey. This can be achieved by a protein fortification of the conventional yogurt by using milk protein or micellar casein concentrates. Another strategy consists to produce an ultrafiltered milk retentate subsequently fermented to manufacture a protein-enriched yogurt. In this case, the dairy waste generated is a deproteinated sweet whey which is more recoverable than acid whey.

Other studies have compared the two different systems of UF for the production of protein-enriched yogurt: the fermentation of UF retentate (UF-MILK) and the UF of yogurt (UF-YOG) in terms of final product characteristics. (35) demonstrated that labneh (a concentrated yogurt popular in the Middle East) produced by UF-YOG and UF-MILK

methods had similar protein and solid contents but the one obtained from UF-YOG method had higher firmness. (68) concluded that shearing effect at the surface of UF membrane during yogurt concentration had an impact on elastic and viscous properties of labneh since the process affected gel structure and produced thicker casein strands than in the traditional sample. Very little information is however available concerning UF performances during protein-enriched yogurt production. (45) determined that highest permeate flux was obtained at 50°C but the total viable counts of the yogurt starter organisms were lower than with labneh ultrafiltered at  $\leq 45^{\circ}\text{C}$ . At low filtration temperatures (25°C to 35°C), (69) showed that permeate flux improvement was achieved at 25°C and high recirculation rate.

The aim of this study was to compare both UF processes (UF-YOG and UF-MILK) for GSY production in terms of acidification rate, ultrafiltration performances, energy consumption and mass balance of milk components upon GSY manufacture.

### 3.3 Materials and methods

#### 3.3.1 Milk and starter culture

Commercial pasteurized skim milk (120 L), purchased from a local dairy supplier (Natrel, Quebec, Canada), was divided into two equal lots. The first lot (60 L) was used for conventional yogurt production (section 2.2) before the concentration step by UF (UF-YOG). The remaining skim milk (60 L) was concentrated by UF for skim milk retentate production (UF-MILK) before fermentation (section 2.4). Both samples were inoculated with a freeze-dried mixed strain culture containing *Streptococcus thermophilus* and *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* (FD-DVS YC-380, 50 U, Chr. Hansen Inc.).

#### 3.3.2 Ultrafiltration system

A pilot-scale UF system (GEA NIRO, USA) with a single membrane cartridge was used. The filtration unit was equipped with a 60L stainless steel storage tank, a sanitary positive displacement pump (D/G-10, 576V, 5 HP Wanner International Ltd), two pressure gauges to monitor inlet and outlet pressure and a flow restriction valve to control inlet pressure. Polyethesulfone (PES) spiral wound UF membranes (Synder Filtration, Vacaville, CA, USA) with molecular weight cut-off of 30 kDa were used. For (UF-MILK) production, a

conventional membrane element with a 46 mil spacer thickness and a 2.04 m<sup>2</sup> membrane surface area was used. However, for (UF-YOG) production, a spacer thickness of 80 mil was selected as recommended by manufacturer due to the high product viscosity. The total membrane surface area was 1.48 m<sup>2</sup> for that element. All ultrafiltration runs were performed at transmembrane pressure (TMP) of 551 kPa (80 psi) and 50°C.

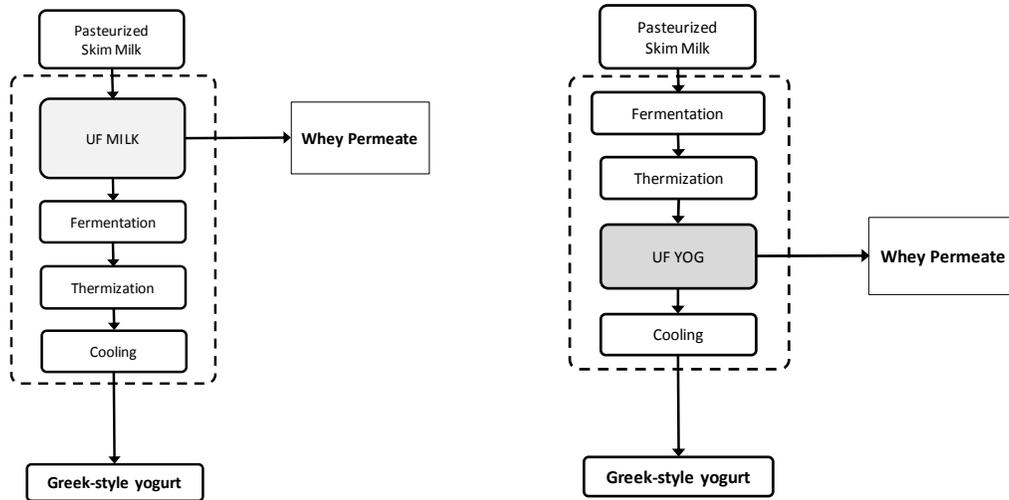
UF membranes were systematically conditioned before each run using the following procedure: a cleaning step was performed at pH 10.5, 50 °C, with 0.1 mol/L of NaOH (Ultrasil 25™, Ecolab inc., Laval, QC Canada), during 10 minutes in a closed circuit at zero pressure. If the chlorine concentration was greater than the allowable limit (checked with Iodine-Chlorine test kit #321), the system was rinsed with tap water; else chlorine was added. This operation was repeated after 10 minutes.

Pure water flux was measured and used as an indicator of membrane cleanliness. An additional cleaning cycle was performed in the case of low (>10%) water flux values in order to restore membrane permeability.

At the end of each filtration experiment, the UF membrane was rinsed. A first cleaning step was performed at pH 10.5 with 0.1 mol/L of NaOH (Ultrasil 25™, Ecolab inc., Laval, QC Canada). The second cleaning step was performed with citric acid solution at 0.1% (v/v) (Ultrasil 76™, Ecolab inc., Laval, QC Canada). In some specific cases, an enzymatic cleaning (Ultrasil 63™, Ecolab inc., Laval, QC Canada) was necessary due to drastic membrane fouling. Between all steps, the system was rinsed with tap water until the neutral pH was reached. The membrane was stored at 4°C in an acid solution of 0.5% (v/v) (Ultrasil MP™, Ecolab inc., Laval, QC Canada) until use.

### 3.3.3 Greek-style yogurt production

Figure 7 depicts the two experimental approaches used to produce GSY at pilot scale.



**Figure 7 : Greek-style yogurt processing including UF concentration step**

### 3.3.4 Yogurt concentration by UF (UF-YOG)

Firstly, pasteurized skim milk was heated at 90°C for 5 min, cooled to 43°C and inoculation was performed according to the methodology of (47) with some modifications. Thus, a starter culture solution was prepared by mixing 3 g of the freeze-dried DVS culture with 25 mL of skim milk at 43°C (12% w/v). The mixture was incubated at 43°C during 10 min to acclimate the starter culture. Afterwards, 6 g of the starter culture was mixing with the 60 L of skim milk at 43°C to obtain a final YC-380 concentration of 0.012 g/L as recommended by yogurt culture supplier. The fermentation step was stopped at pH 4.5-4.6 and thermization was performed at 60°C during 80 sec to avoid recontamination and to minimize post-fermentation. Conventional yogurt was finally cooled at 4°C before until concentration step by UF.

Afterwards, conventional yogurt (60 L) was heat at 50°C and transferred into the UF stainless steel storage tank. A plate heat exchanger was used to maintain the yogurt temperature during the UF step. The yogurt was concentrated in batch mode, i.e., retentate was recycled back and permeate was continuously removed until a theoretical volumetric concentration factor (VCF) of 3.0X was reached. Retentate and permeate

sample were collected at the end for filtration and the final volume of retentate was cooled at 4°C until analysis.

### 3.3.5 Skim milk concentration by UF before fermentation (UF-MILK)

Ultrafiltration conditions and parameters (TMP, VCF) were the same as those described for (UF-YOG) production. At the end of UF, samples retentate and permeate were collected. The remaining retentate was cooled at 43°C and used for GSY production (UF-MILK) according to the methodology described earlier (see section 2.3.1) for fermentation.

### 3.3.6 Energy consumption during UF

Real-time measurement of voltage and current values were obtained with a current clamp (Model Fluke 3000FC, ON, Canada) which was directly connected to the positive displacement pump of UF system. Voltage and current values were automatically recorded every minute during all UF step. These values were used for real power consumption calculation (Eq. 1) of the three-phase motor of the pump:

$$W = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos(\theta) \quad \text{Eq. 1}$$

where  $W$  is the real power consumption (Watt);  $V$  the voltage (Volt);  $I$  the current (Ampere),  $\cos(\theta)$ , the power factor.  $\cos(\theta)$  was automatically determined by current clamp system during concentration by UF and was ranged from 0,54 to 0,55.

The power consumption was converted to kilowatt hour (kWh) by using Eq. 2:

$$P = \frac{W \times t}{1000} \quad \text{Eq. 2}$$

where  $P$  is the power consumption (kWh);  $W$ , the real power consumption (W),  $t$ , the UF duration (h).

Energy consumption data were used to compare the energy required to produce a kg of GSY from UF-MILK and UF-YOG experiments.

### 3.3.7 Analytical methods

Compositions of initial skim milk, UF permeate and retentate as well as GSY samples were obtained by the following analytical methods. Total solids were measured using the AOAC 925.23 method. Total nitrogen was obtained by combustion using a LECO-FP528 carbon and nitrogen analyser (LECO, St. Joseph, Michigan). Nitrogen concentrations in the samples were converted into protein percentages by multiplying the nitrogen result by a conversion factor of 6.38, the value commonly used for milk proteins. Ash was obtained by gravimetry according to the AOAC 930.30 method. Lactose and acid lactic concentration were determined through high-performance liquid chromatography (HPLC) with a Waters chromatograph (Waters Corp., Milford, Massachusetts, USA), equipped with an Hitachi (Foster City California, USA) differential refractometer detector, a 600E controller, a column oven, and a cooled 717Plus autosampler. An ICsep ION-300 column (Transgenomic, Omaha, Nebraska, USA) was used with 8.5 mM of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> as the mobile phase at a flow rate of 0.4 mL min<sup>-1</sup>. The column temperature was kept constant at 40°C. External standard calibration was performed for quantifications.

### 3.3.8 Statistical analyses

All experiments ([UF YOG] and [UF MILK]) were performed in triplicate. Permeation flux as a function of time was subjected to a repeated measure analysis of variance ( $P < 0.05$  as probability level for acceptance) using SAS software version 9.1 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). Compositional differences of products (retentate and permeate) from UF-MILK and UF-YOG were determined by using Student test (t-test).

## 3.4 Results and discussion

### 3.4.1 Compositional characteristics of initial milk, retentates, GSY and permeates

Table 5 presents the composition of skim milk, UF retentate and permeate as well as GSY obtained after skim milk and retentate fermentation by YC-380 culture for both process UF MILK and UF-YOG.

**Table 5 : Comparative composition of UF fractions and final composition of greek-style yogurts**

Components on dry basis wt/wt (%)	[UF MILK]				[UF YOG]			
	Initial milk	Retentate	GYS	Permeate	Initial milk	Conventional yogurt	GYS	Permeate
TS	9.09±0.02 <sup>a</sup>	17.34±0.38 <sup>b</sup>	17.58±0.28 <sup>b</sup>	5.35±0.04 <sup>c</sup>	8.72±0.4 <sup>a</sup>	9.08±0.05 <sup>a</sup>	16.4±0.8 <sup>b</sup>	4.94±0.6 <sup>c</sup>
Protein <sup>1</sup>	3.85±0.07 <sup>a</sup>	11.09±0.59 <sup>b</sup>	10.68±0.46 <sup>b</sup>	0.62±0.05 <sup>c</sup>	3.86±0.06 <sup>a</sup>	3.90±0.27 <sup>a</sup>	9.97±1.46 <sup>b</sup>	0.71±0.18 <sup>c</sup>
Lactose	4.90±0.02 <sup>a</sup>	5.24±0.08 <sup>b</sup>	1.49±0.10 <sup>c</sup>	4.43±0.29 <sup>a</sup>	4.90±0.06 <sup>a</sup>	3.50±0.16 <sup>d</sup>	3.41±0.14 <sup>d</sup>	2.83±0.28 <sup>c</sup>
Ash	0.72±0.04 <sup>a</sup>	1.39±0.15 <sup>b</sup>	1.45±0.04 <sup>b</sup>	0.42±0.03 <sup>c</sup>	0.76±0.06 <sup>a</sup>	0.75±0.01 <sup>a</sup>	0.83±0.01 <sup>a</sup>	0.67±0.01 <sup>a</sup>
Lactic acid	ND <sup>2</sup>	ND	1.29±0.04 <sup>a</sup>	ND	ND	0.58±0.05 <sup>b</sup>	0.90±0.05 <sup>c</sup>	0.73±0.019 <sup>d</sup>

[UF MILK]: UF of skim milk to generate retentate which was fermented to produce GTY. [UF YOG]: UF of conventional yogurt to produce GSY. <sup>1</sup> Protein = total nitrogen x 6.38. <sup>2</sup>ND: not detected. Different letters indicate significant differences between applied pressures ( $p < 0.05$ ).

Concerning UF MILK (skim milk was concentrated by UF and the retentate was fermented to produce GSY), and as expected TS, protein and ash increased from initial skim milk to retentate due to concentration by UF. Since lactose is theoretically not rejected during UF of skim milk (lactose rejection was calculated as 0.16), its concentration increased in permeate. Protein concentration in retentate indicated that volume reduction factor (VRF) reached 2.9X which is close to the theoretical VRF of 3.0 X targeted. The protein concentration in permeate was 0.62±0.05% which represented a rejection coefficient of 0.95 which is consistent with literature. Retentate and GSY had similar composition expected for lactose and lactic acid. Indeed, during fermentation lactose concentration decreased in GSY while lactic acid, initially absent in the retentate, increased in the GSY due to ferment activity.

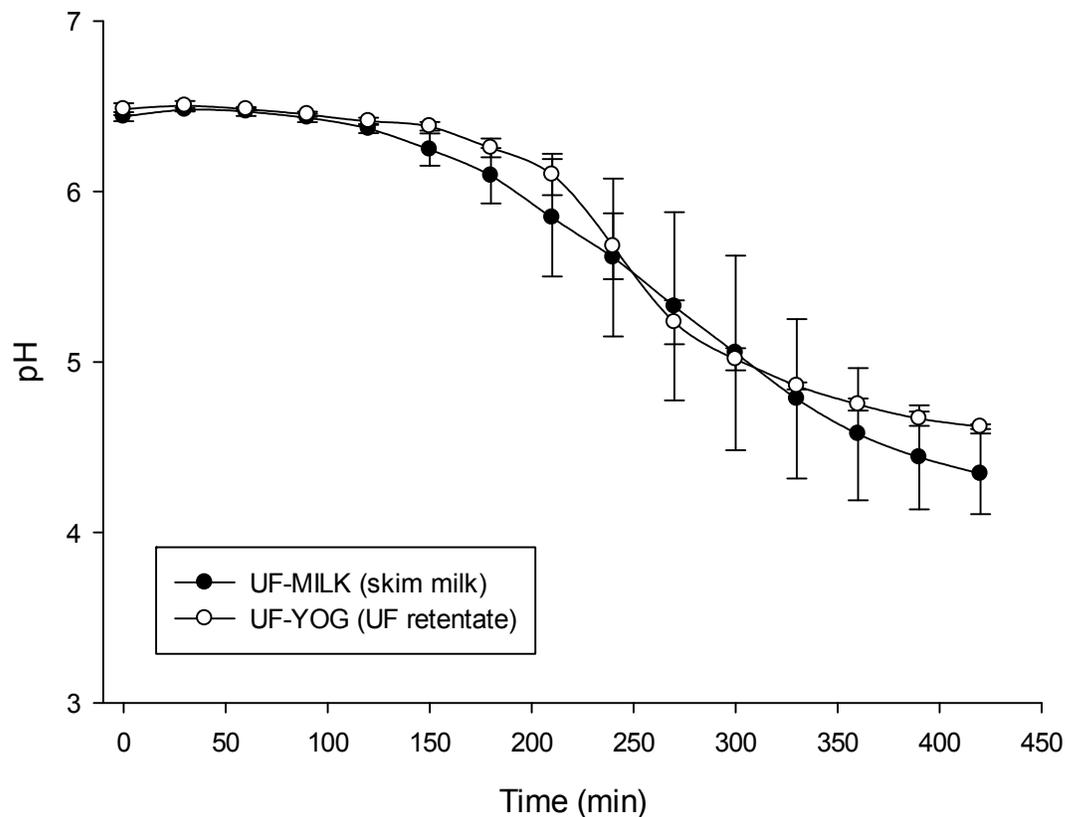
Concerning UF YOG process, and as presented for UF MILK, composition of initial milk and conventional yogurt was similar except for lactose and lactic acid due to fermentation step. After concentration of conventional yogurt by UF, protein concentration increased by a factor 2.6X in GSY and rejection coefficient was calculated as 0.82. Lactic acid

concentration in permeate was two times greater than in the conventional yogurt due to UF concentration step.

When UF-MILK and UF-YOG are compared, TS as well as protein content in both GSY and permeate was not different ( $P>0.05$ ). However lactose concentration was higher for UF YOG while ash and lactic acid were lower compared to UF MILK.

### 3.4.2 Acidification curve during conventional and GSY production

Figure 8 shows the acidification profile of skim milk and UF retentate.



**Figure 8 : Acidification curves during conventional yogurt and retentate fermentation for Greek-style yogurt production**

No significant difference ( $P>0.05$ ) in terms of acidification rate was observed. Indeed, a similar rate of 0.33 pH unit/60 min was obtained since initial pH of both matrices was about 6.5 and decrease to  $4.34\pm 0.24$  and  $4.62\pm 0.01$  for skim milk and retentate, respectively

after 420 min. This result with the use of a same starter culture concentration for both matrices (UF retentate and conventional yogurt) is surprising since pH reduction with lactic cultures is slow during milk retentate fermentation because buffering capacity is increased due to a high concentration of calcium phosphate and proteins.

### 3.4.3 Ultrafiltration performances

Table 6 summarizes the separation performances of the two membrane elements used for UF experiments.

**Table 6: Comparative rejection coefficient of the 30 kDa upon UF of milk or yogurt**

		UF MILK	UF YOG
Rejection coefficient ( $\sigma$ )	Protein	0.95	0.93
	Lactose	0.16	0.18
	Ash	0.70	0.20
	Lactic acid	N/A	0.19
Average flux (L.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup>		12.3	22.1
Total flux decline (%) <sup>b</sup>		50-53	62-87
Flux recovery upon cleaning (%)		100%	N/A <sup>c</sup>
Energy consumption for UF (KWh/kg GSY)		1.6 - 1.7	0.6 - 1.5

a. Average permeation flux over time for the 3 repetitions

b. Percentage between the final flux and initial flux (lowest and highest depending on repetitions)

c. Severe fouling occurred with that membrane and several cleaning cycles were required to restore flux. (see text for details)

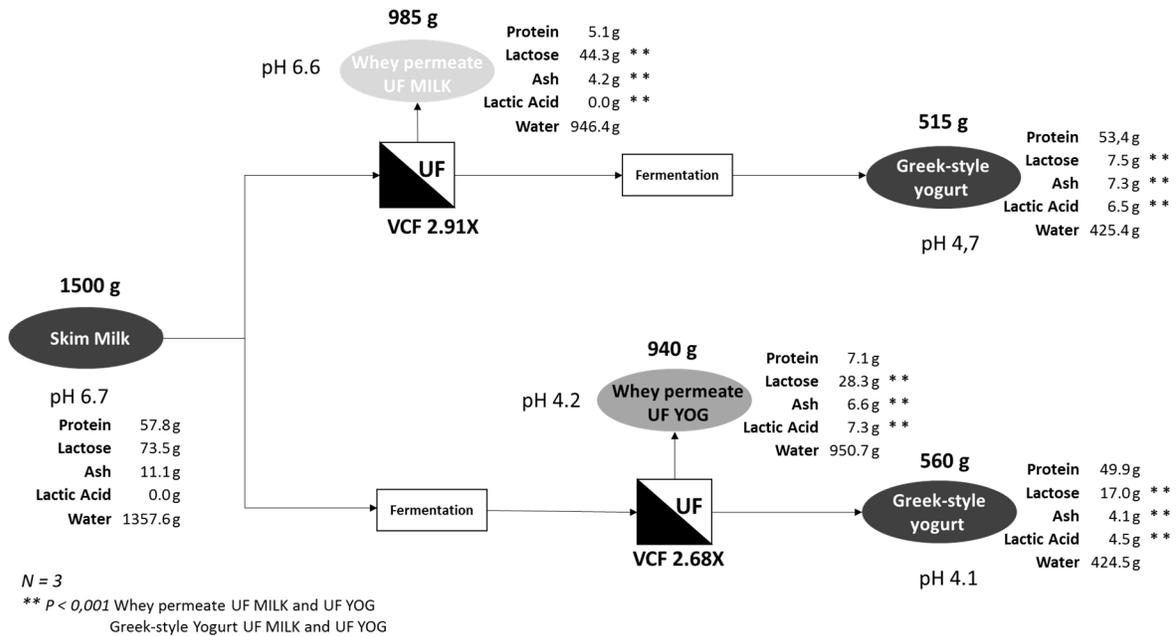
Similar rejection coefficients ( $\sigma$ ) were observed for the two membranes regarding proteins (0.95 vs 0.93) and lactose (0.16 vs 0.18). However, (UF-milk) membrane showed a much higher  $\sigma$  (0.70) for ash components in comparison with the (UF-YOG) membrane ( $\sigma=0.20$ ). This discrepancy can be attributed to the lower pH value of yogurt that favoured a higher proportion of soluble salts (11) and greater permeability of through the UF membrane. The permeability of lactic acid could not be measured upon UF on milk, however a  $\sigma$  value of 0.19 was found for (UF-YOG), which is in line with the permeability value of 0.18 found for lactose during the same UF experiments.

Table 6 also reports permeation flux performances with the two membrane elements. Despite the fact that the (UF-YOG) membrane had a much thicker spacer than the (UF-MILK) membrane (80 vs 46 mil), average flux values were higher for the (UF-MILK) membrane (45 L.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>) in comparison with the (UF-YOG) membrane (35 L.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>). The measured flux decline upon VCF=3X concentration was also higher for the (UF-MILK) membrane. However, despite this apparent greater susceptibility to fouling the flux recovery of (UF-MILK) membrane was complete (100%) as opposed to the (UF-YOG) membrane for which severe fouling occurred and several (5-7) cleaning cycles were necessitated to restore water flux of the membrane. It can be hypothesized that 80 mil spacer thickness promoted the accumulation of precipitated casein grains through the grid structure. That required prolonged exposure of membrane element to cleaning conditions in order to completely remove fouling material.

The overall energy consumption for the production of 1 kg of GSY was similar for the two membranes (~1.0-1,5 KWh/kg GSY). Of course this estimate does not take into account the extra energy requirements for cleaning. This is especially important since fouling issues were encountered with the (UF-YOG) membrane element. Perhaps another membrane configuration such as tubular, allowing the UF-concentration of viscous feeds and/or feeds containing suspended particles, would be more appropriate for yogurt concentration (70)

#### 3.4.4 Comparative mass balance

As shown in Figure 9, the use of the two approaches (UF-MILK vs UF-YOG) led to similar quantities of GSY (515 g vs 560 g) that also displayed similar compositions (see Table 5).



**Figure 9 : Average mass balance of milk components as influenced by GSY production method**

However, some differences must be noted in the distribution of some milk components in the co-products of both processes (UF-permeates). Permeate from (UF-YOG) contained a greater proportion of milk salts in comparison with that from (UF-MILK) (6.6 g vs 4.2 g). It also contained less lactose and some lactic acid (7.3 g). This difference represent 22 % of the initial lactose content that won't be available for further processing. Actually, valorization of lactose contained in the (UF-YOG) permeate pose a challenge by the presence of lactic acid which interferes with lactose purification (71). This is of significant importance considering that the most abundant solids from skim milk is lactose and that its valorization is key to determine the economic viability of whey permeate processing by ingredients manufacturers (44). The UF-MILK process allow to generate a mild permeate likely to facilitate the valorization of its component and therefore with potentially higher economic value.

### 3.5 Conclusions

The present work provides some evidences that performing UF on milk before fermentation in the manufacture of GSY is beneficial in terms of mass balance because the milk components are better valorized. Since the performances of the 80 mil membrane

spacer used for (UF-YOG) in this study did not prove to be optimal in terms of UF-performances for yogurt, further work should be done in order to identify a better membrane configuration.

### **3.6 Acknowledgements**

This work was funded by the Le Fonds Recherche Québec - Nature et les Technologies (FQRNT, Quebec city, Quebec, Canada) – Novalait Inc. (Sainte-Foy, Quebec, Canada) – Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ, Quebec city, Quebec, Canada).

## Chapitre 4. Évaluation de l'impact environnemental des deux procédés de fabrication de yogourt concentré

Les résultats obtenus jusqu'à maintenant lors de la production à échelle pilote des deux yogourts de référence montrent que UF LAIT est le procédé permettant une meilleure utilisation de tous les constituants du lait ainsi qu'une meilleure efficacité lors de l'UF. Ce chapitre va permettre d'évaluer les impacts environnementaux des deux procédés, et vérifier si UF LAIT est encore le procédé le plus performant.

L'évaluation comparative, par la méthode d'ACV, des deux procédés de fabrication de yogourt concentré permet d'obtenir une approche multicritère des impacts environnementaux des deux systèmes étudiés. Cette ACV comparative décrit les impacts environnementaux dans une approche attributionnelle (ACV-A) où les impacts sont attribués de façon rétrospective au produit final : le yogourt concentré.

Le logiciel SimaPro, la méthode d'analyse IMPACT 2002+ ainsi que la base de données d'inventaire (ICV) Ecoinvent, avec son adaptation au marché canadien, sont utilisés pour la modélisation des deux systèmes.

Les résultats de l'étude sont présentés sous la forme d'indicateurs d'impacts environnementaux selon 4 catégories de dommage représentant les changements de qualité de l'environnement définis par la méthode d'analyse IMPACT 2002+ sont : la santé humaine, le changement climatique, la qualité des écosystèmes, et l'utilisation des ressources.

Cette étude est un outil pour poursuivre les recherches dans le domaine.

### 4.1 Objectif de l'étude

Le but de cette étude est de vérifier l'hypothèse que le choix du procédé de fabrication du yogourt concentré utilisant l'ultrafiltration du lait avant fermentation (UF LAIT) permettrait une réduction des impacts environnementaux liés à la fabrication industrielle actuelle du yogourt grec traditionnel (UF-YOG).

## 4.2 Champ d'étude

Cette étude propose une ACV comparative de la fabrication de deux yogourts concentrés contenant chacun 10% de protéines et 0% de matière grasse. Cette ACV comparative considère les impacts de la fabrication de yogourt concentré de production du lait jusqu'à l'obtention du yogourt concentré, après fermentation. Elle présente d'une part les impacts environnementaux liés à chaque étape : production du lait, transport du lait et fabrication du yogourt. Les étapes de fabrication incluent écrémage, homogénéisation, traitement thermique, ultrafiltration, thermisation, fermentation, ainsi que le CIP (cleaning in place) ou NEP (nettoyage en place).

Les deux méthodes de fabrication de yogourt concentré étudiées sont :

- **[UF YOG]** : le yogourt traditionnel est concentré par ultrafiltration (UF) en produisant un perméat acide présentant un impact environnemental élevé. Cette méthode de fabrication est appliquée actuellement au niveau industriel.
- **[UF LAIT]** : le lait est pré-concentré par UF avant la fermentation, générant un perméat doux pouvant potentiellement réduire les impacts environnementaux causés par la production actuelle industrielle de yaourt concentré. Cette méthode est innovante et n'est pas appliquée à un niveau industriel.

### 4.2.1 Définition de la fonction

**Tableau 7 : fonctions principale et secondaires**

Méthode de fabrication	Fonction principale	Fonctions secondaires
<b>[UF YOG]</b>	Production d'1 kg de yogourt concentré (10% protéines -	Production de perméat acide d'ultrafiltration
<b>[UF LAIT]</b>	0% m.g)	Production de perméat doux d'ultrafiltration

### 4.3 Unité Fonctionnelle

Les impacts environnementaux présentés dans cette étude sont exprimés sur la base d'une unité fonctionnelle définie comme la production de **1 kg de yogourt concentré à 10% de protéines et 0% de matière grasse, non emballé.**

### 4.4 Frontières des systèmes

Les deux méthodes de fabrication de yogourt concentré, appelées systèmes de produit dans une perspective de cycle de vie, tiennent en compte la production à échelle pilote effectuée dans le laboratoire pilote de la faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation de l'université Laval (se référer au chapitre Chapitre 3 pour les détails).

Cette étude considère les impacts de la fabrication de yogourt concentré incluant la production du lait, le transport et la transformation jusqu'à l'obtention de 1 kg de yogourt concentré non emballé.

Les étapes décrites dans le Tableau 8 ont été exclues des deux systèmes étudiés.

**Tableau 8 : Étapes exclues des systèmes de produits**

<b>Processus exclus</b>	<b>Justification</b>
<b>Étape : Ultrafiltration</b>	
Production et durée vie de l'équipement du système d'ultrafiltration et des membranes d'ultrafiltration.	Le système d'ultrafiltration va servir à filtrer une très grande quantité de lait ou de yogourt, sa part est donc négligeable pour la production de 1kg de yogourt concentré.
<b>Étape : Emballage</b>	
Mise en pot du yogourt.	L'objectif de l'étude est de mesurer l'impact de la fabrication du yogourt concentré. L'étape d'emballage est considérée égale dans les deux systèmes étudiés et exclue des frontières du système.
<b>Étape : Infrastructures</b>	

Construction, maintenance, et Le laboratoire pilote ne sert pas uniquement au démantèlement du laboratoire procédés de fabrication de yogourt concentré, sa part est donc négligeable pour la production de 1kg de yogourt concentré et égale dans les deux systèmes de produits.

#### 4.4.1 Description du système de fabrication de yogourt concentré par [UF YOG]

Le système de fabrication de yogourt concentré par ultrafiltration du yogourt conventionnel [UF YOG] est composé de 9 étapes : production du lait, transport du lait, écrémage, homogénéisation, traitement thermique, fermentation, thermisation, ultrafiltration et refroidissement, tel comme indiqué dans la Figure 10.

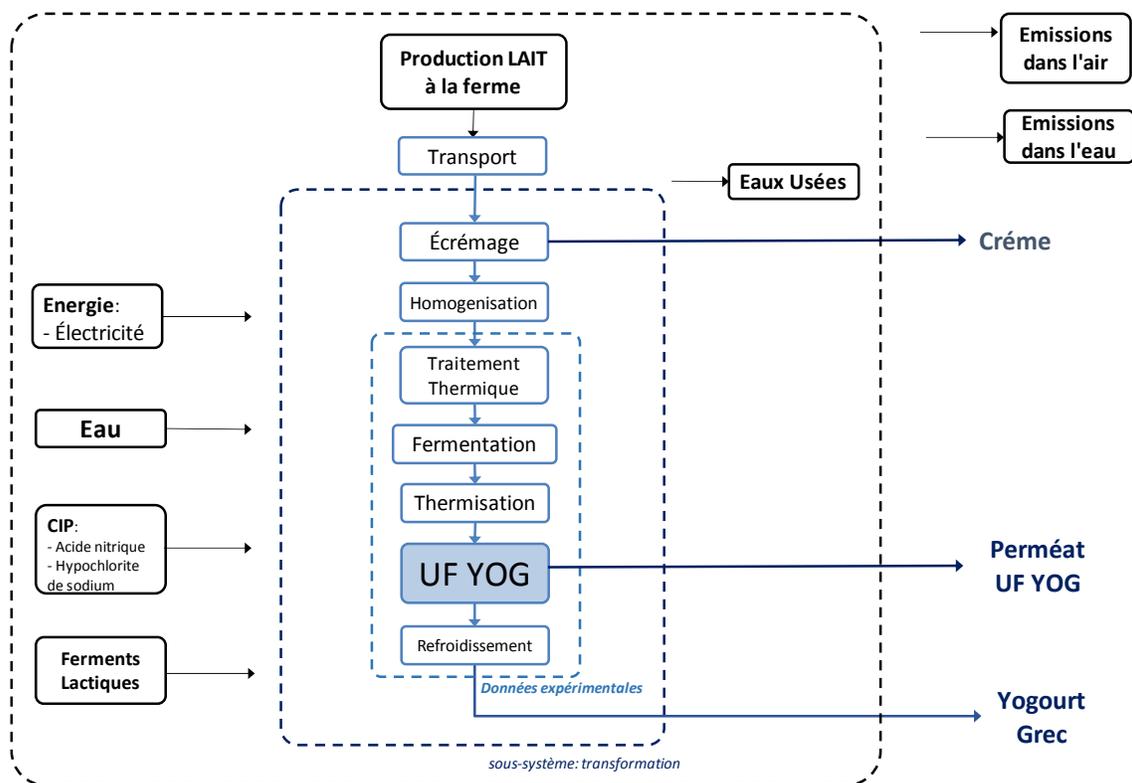


Figure 10 : Frontières du système : fabrication de yogourt concentré par [UF YOG]

#### 4.4.2 Description du système de fabrication de yogourt concentré par [UF LAIT]

Le système de fabrication de yogourt concentré par ultrafiltration du lait [UF LAIT] est composé de 9 étapes : production du lait, transport du lait, écrémage, homogénéisation, traitement thermique, ultrafiltration, fermentation, thermisation et refroidissement. Ce système diffère du système de fabrication [UF YOG] par le fait que l'étape de fermentation a lieu après l'étape d'ultrafiltration (Figure 11).

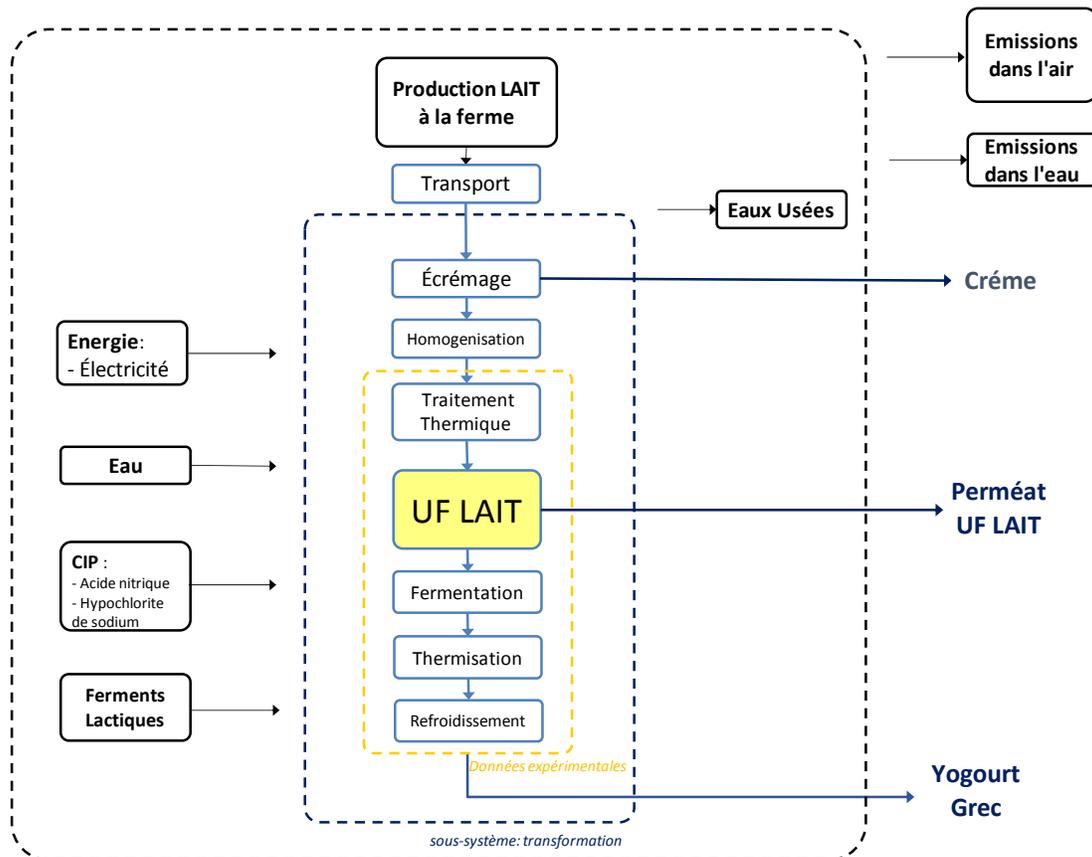


Figure 11 : Frontières du système : fabrication de yogourt concentré par [UF LAIT]

#### 4.5 Flux de références et paramètres clés

Afin de calculer la consommation d'énergie, de matières premières, d'eau nécessaire, ainsi que la production de déchets pour la fabrication de 1kg de yogourt grec (unité fonctionnelle), un bilan de matière du lait et de ses composants est effectué à partir de la quantité de matière sortante de chaque étape de fabrication comme identifié dans les

Figure 9 et 10. En parallèle les flux de référence ont été calculés, c'est-à-dire les entrants (matière et énergie) ou activités (par exemple transport) nécessaires à assurer l'unité fonctionnelle (production de 1kg de yogourt), à l'aide des paramètres clés.

Le Tableau 9 présente les paramètres clés utilisés pour chaque étape de fabrication ainsi que les hypothèses faites. Le Tableau 10 présente le bilan de matière pour chaque étape, comparé entre [UF YOG] et [UF LAIT].

Pour calculer la masse du lait utilisé à l'entrée de chaque étape des procédés, un calcul de bilan de matière à l'inverse a été effectué. Ainsi, pendant l'étape d'ultrafiltration, le rétentat sortant a été multiplié par le facteur de concentration (FCV) correspondant. Ensuite, cette valeur de masse de lait a été prise en compte pour calculer les quantités d'énergie et d'eau utilisées par le système nécessaires pour produire 1 kg de yogourt concentré. Les Tableau 11 et Tableau 12 présentent, respectivement pour [UF YOG] et [UF LAIT] les flux de référence calculés à partir des paramètres clés.

**Tableau 9 : Paramètres clés et hypothèses associées**

<b>Paramètres clés</b>	<b>Valeur</b>	<b>Hypothèse</b>
<b>COMMUN À TOUTES LES ÉTAPES</b>		
Composition du lait entier	matière grasse (4,1 kg/hl); protéine (3,36kg/hl); lactose et autres solides (5,71kg/hl); solides totaux (13,14kg/hl) (72).	Valeur moyenne au Québec en 2012-2013
Masse volumique du lait entier	1 032 g/l	pour du lait entier à 40 g/l de matière grasse (18)
Masse volumique du lait écrémé	1 036 g/l	Pour du lait écrémé (18)
Masse volumique du yogourt conventionnel	1033 g/l	(73)

Masse volumique du yogourt concentré	1040 g/l	(73)
--	----------	------

---

### PRODUCTION

---

Les données de production du lait cru ont été obtenues dans la nouvelle version base de données Ecoinvent v3 (via SimaPro). Ecoinvent v3 contient la production des aliments pour l'élevage et la traite des animaux à la ferme dans le contexte québécois.

---

### TRANSPORT

---

Transport du lait (de la ferme à l'usine)	192 km	Transport moyen pour 1kg de lait, sachant qu'il y a 29 748 901 km annuels pour 262 camions citernes de 32 tonnes de lait sur 589 circuits (74).
Transport du lait (de l'usine vers le laboratoire pilote)	11 km	Calcul de l'itinéraire entre l'usine Natrel Québec et le laboratoire pilote de l'Université Laval

---

### ÉCRÉMAGE

---

Il est considéré qu'il n'y a pas de perte de matière : les pourcentages en protéines, lactose et cendres du lait sont les même que dans le lait écrémé analysé au laboratoire pilote.

m.g de la crème	35%	
m.g du lait écrémé	0%	Malgré le fait qu'il reste 0,08 % de matière grasse à la suite de l'écémage, il est considéré que le lait écrémé contient 0% de m.g.
Débit du lait	0,64 m <sup>3</sup> /h	
Puissance de l'écémuseuse	1,5 kW	Données de l'écémuseuse (75)

---

---

### HOMOGENÉISATION

---

Il est considéré qu'il n'y a pas de perte de matière : les pourcentages en protéines, lactose et cendres du lait sont les même que dans le lait écrémé analysé au laboratoire pilote.

---

Débit du lait	0,2 m <sup>3</sup> /h
---------------	-----------------------

---

puissance de l'homogénéisateur	4 kW
--------------------------------	------

Données de l'homogénéisateur (76)

---

### TRAITEMENT THERMIQUE

---

---

Débit de lait	4,80E-2 m <sup>3</sup> /h
---------------	---------------------------

Il est considéré qu'il n'y a pas de perte de matière.

Il est considéré un débit minimum d'opération afin de maximiser le temps du traitement thermique. Car le temps de rétention maximum du pasteurisateur est de 28 s avec un débit du lait de 800ml/min.

---

Débit d'eau froide	720 l/h
--------------------	---------

L'eau utilisé pour le refroidissement est re-circulée

---

puissance du pasteurisateur	30 kW
-----------------------------	-------

puissance incluant le préchauffage (77)

---

### FERMENTATION

---

Il est considéré qu'il n'y a pas de perte de matière.

La fermentation s'effectue à 43°C.

Les pourcentages de protéines, lactose et cendres ont été mesurés au laboratoire pilote, à la fois pour le lait et pour le yogourt.

---

Ferments UF YOG	3,75 E-5 kg
-----------------	-------------

pour 2,68 kg de lait

---

Ferments UF LAIT	1,40 E-5 kg
------------------	-------------

pour 1 kg de lait concentré

---

Temps de fermentation UF YOG	5h	moyenne des essais au laboratoire pilote
Temps de fermentation UF LAIT	6h	
Puissance du fermenteur	0,218 kW	La capacité du fermenteur est de 254 kg (78)

### THERMISATION

Il est considéré qu'il n'y a pas de perte de matière.

Il est considéré que la thermisation se fait dans le pasteurisateur, les données sont donc les mêmes que pour l'étape de traitement thermique.

### ULTRAFILTRATION

Les pourcentages de protéines, lactose et cendres ont été mesurés au laboratoire pilote, à la fois pour le yogourt, le perméat et le yogourt concentré dans le cas de UF YOG, et pour le lait, le perméat et le lait concentré dans le cas de UF LAIT.

Durée de l'ultrafiltration UF YOG	0,8h	Mesurée au laboratoire pour 35,5kg de Yogourt
Durée de l'ultrafiltration UF LAIT	1,41h	Mesurée au laboratoire pour 59,7kg de Lait
puissance de l'appareil d'ultrafiltration pour UF YOG	2,1 kW	Données mesurées au laboratoire pilote (pour plus de détails voir le chapitre 3.3)

Puissance de l'appareil d'ultrafiltration pour UF LAIT	2,2 kW	
Débit d'eau chaude	100 l/h	Eau chauffée à 50°C par une chaudière électrique (79). L'eau chaude n'est pas re-circulée, elle est donc envoyée vers une station d'épuration avec les eaux des opérations de nettoyages et désinfections.

### REFROIDISSEMENT

Consommation énergétique de l'unité de réfrigération	0,02 kWh/l de yogourt	Le refroidissement est effectué par un échangeur à plaque avec réfrigérant en recirculation (il ne nécessite pas d'eau) (80)
--	-----------------------	--

### CIP

Consommation d'eau	0,217 kg	
Acide nitrique	0,008 kg	pour 1kg de lait transformé en usine (81) (82)
Hypochlorite de sodium	0,006 kg	
Consommation électrique	2,14E-04 kWh	
Vapeur d'eau	2,01E-04 kg	

**Tableau 10 : bilan de matière comparatif des deux procédés**

Bilan Matière UF YOG					Bilan Matière UFLAIT				
ENTRANT	SORTANT				ENTRANT	SORTANT			
Quantité	Quantité	Composants	%	kg	Quantité	Quantité	Composants	%	kg
	<b>Production du Lait</b>								
	3,02 kg	ST	13,46%	0,41		3,27 kg	ST	13,41%	0,44
		m.g	3,94%	0,12			m.g	3,94%	0,12
	Lait entier produit à la ferme	Protéines	3,86%	0,12		Lait entier produit à la ferme	Protéines	3,85%	0,12
		Lactose	4,90%	0,15			Lactose	4,90%	0,15
		Cendres	0,76%	0,02			Cendres	0,72%	0,02
		Eau	86,54%	2,61			Eau	86,59%	2,83

Transport du Lait					Transport du Lait				
<b>3,02 kg</b>	<b>3,02 kg</b>	<b>ST</b>	<b>13,46%</b>	<b>0,41</b>	<b>3,27 kg</b>	<b>3,27 kg</b>	<b>ST</b>	<b>13,41%</b>	<b>0,44</b>
<i>Lait entier produit à la ferme</i>	<i>Lait entier</i>	<i>m.g</i>	<i>3,94%</i>	<i>0,12</i>	<i>Lait entier produit à la ferme</i>	<i>Lait entier</i>	<i>m.g</i>	<i>3,94%</i>	<i>0,13</i>
		<b>Protéines</b>	<b>3,86%</b>	<b>0,12</b>			<b>Protéines</b>	<b>3,85%</b>	<b>0,13</b>
		<i>Lactose</i>	<i>4,90%</i>	<i>0,15</i>			<i>Lactose</i>	<i>4,90%</i>	<i>0,16</i>
		<i>Cendres</i>	<i>0,76%</i>	<i>0,02</i>			<i>Cendres</i>	<i>0,72%</i>	<i>0,02</i>
		<i>Eau</i>	<i>86,54%</i>	<i>2,61</i>			<i>Eau</i>	<i>86,59%</i>	<i>2,83</i>
Écrémage à froid					Écrémage à froid				
<b>3,02 kg</b>		<b>ST</b>	<b>13,46%</b>	<b>0,41</b>	<b>3,27 kg</b>		<b>ST</b>	<b>13,41%</b>	<b>0,44</b>
<i>Lait entier</i>		<i>m.g</i>	<i>3,94%</i>	<i>0,12</i>	<i>Lait entier</i>		<i>m.g</i>	<i>3,94%</i>	<i>0,13</i>
		<b>Protéines</b>	<b>3,86%</b>	<b>0,12</b>			<b>Protéines</b>	<b>3,85%</b>	<b>0,13</b>
		<i>Lactose</i>	<i>4,90%</i>	<i>0,15</i>			<i>Lactose</i>	<i>4,90%</i>	<i>0,16</i>
		<i>Cendres</i>	<i>0,76%</i>	<i>0,02</i>			<i>Cendres</i>	<i>0,72%</i>	<i>0,02</i>
		<i>Eau</i>	<i>86,54%</i>	<i>2,61</i>			<i>Eau</i>	<i>86,59%</i>	<i>2,83</i>
	<b>0,34 kg</b>	<b>ST</b>	<b>44,52%</b>	<b>0,15</b>		<b>0,37 kg</b>	<b>ST</b>	<b>44,47%</b>	<b>0,16</b>
	<i>Crème</i>	<i>m.g</i>	<i>35,00%</i>	<i>0,12</i>		<i>Crème</i>	<i>m.g</i>	<i>35,00%</i>	<i>0,13</i>
		<b>Protéines</b>	<b>3,86%</b>	<b>0,01</b>			<b>Protéines</b>	<b>3,85%</b>	<b>0,01</b>
		<i>Lactose</i>	<i>4,90%</i>	<i>0,02</i>			<i>Lactose</i>	<i>4,90%</i>	<i>0,02</i>
		<i>Cendres</i>	<i>0,76%</i>	<i>0,00</i>			<i>Cendres</i>	<i>0,72%</i>	<i>0,00</i>
		<i>Eau</i>	<i>55,48%</i>	<i>0,19</i>			<i>Eau</i>	<i>55,53%</i>	<i>0,21</i>
	<b>2,68 kg</b>	<b>SNG</b>	<b>9,52%</b>	<b>0,25</b>		<b>2,91 kg</b>	<b>SNG</b>	<b>9,47%</b>	<b>0,28</b>
	<i>Lait écrémé</i>	<i>m.g</i>	<i>0,00%</i>	<i>0,00</i>		<i>Lait écrémé</i>	<i>m.g</i>	<i>0,00%</i>	<i>0,00</i>
		<b>Protéines</b>	<b>3,86%</b>	<b>0,10</b>			<b>Protéines</b>	<b>3,85%</b>	<b>0,11</b>
		<i>Lactose</i>	<i>4,90%</i>	<i>0,13</i>			<i>Lactose</i>	<i>4,90%</i>	<i>0,14</i>
		<i>Cendres</i>	<i>0,76%</i>	<i>0,02</i>			<i>Cendres</i>	<i>0,72%</i>	<i>0,02</i>
		<i>Eau</i>	<i>90,48%</i>	<i>2,42</i>			<i>Eau</i>	<i>90,53%</i>	<i>2,63</i>
Homogénéisation					Homogénéisation				
<b>2,68 kg</b>		<b>SNG</b>	<b>9,52%</b>	<b>0,25</b>	<b>2,91 kg</b>		<b>SNG</b>	<b>9,47%</b>	<b>0,28</b>
<i>Lait écrémé</i>		<b>Protéines</b>	<b>3,86%</b>	<b>0,10</b>	<i>Lait écrémé</i>		<b>Protéines</b>	<b>3,85%</b>	<b>0,11</b>
		<i>Lactose</i>	<i>4,90%</i>	<i>0,13</i>			<i>Lactose</i>	<i>4,90%</i>	<i>0,14</i>
		<i>Cendres</i>	<i>0,76%</i>	<i>0,02</i>			<i>Cendres</i>	<i>0,72%</i>	<i>0,02</i>
		<i>Eau</i>	<i>90,48%</i>	<i>2,42</i>			<i>Eau</i>	<i>90,53%</i>	<i>2,63</i>
	<b>2,68 kg</b>	<b>SNG</b>	<b>9,52%</b>	<b>0,25</b>		<b>2,91 kg</b>	<b>SNG</b>	<b>9,47%</b>	<b>0,28</b>
	<i>Lait homogénéisé</i>	<b>Protéines</b>	<b>3,86%</b>	<b>0,10</b>		<i>Lait homogénéisé</i>	<b>Protéines</b>	<b>3,85%</b>	<b>0,11</b>
		<i>Lactose</i>	<i>4,90%</i>	<i>0,13</i>			<i>Lactose</i>	<i>4,90%</i>	<i>0,14</i>
		<i>Cendres</i>	<i>0,76%</i>	<i>0,02</i>			<i>Cendres</i>	<i>0,72%</i>	<i>0,02</i>
		<i>Eau</i>	<i>90,48%</i>	<i>2,42</i>			<i>Eau</i>	<i>90,53%</i>	<i>2,63</i>
Traitement thermique					Traitement thermique				
<b>2,68 kg</b>		<b>SNG</b>	<b>9,52%</b>	<b>0,25</b>	<b>2,91 kg</b>		<b>SNG</b>	<b>9,47%</b>	<b>0,28</b>
<i>Lait homogénéisé</i>		<b>Protéines</b>	<b>3,86%</b>	<b>0,10</b>	<i>Lait homogénéisé</i>		<b>Protéines</b>	<b>3,85%</b>	<b>0,11</b>
		<i>Lactose</i>	<i>4,90%</i>	<i>0,13</i>			<i>Lactose</i>	<i>4,90%</i>	<i>0,14</i>
		<i>Cendres</i>	<i>0,76%</i>	<i>0,02</i>			<i>Cendres</i>	<i>0,72%</i>	<i>0,02</i>
		<i>Eau</i>	<i>90,48%</i>	<i>2,42</i>			<i>Eau</i>	<i>90,53%</i>	<i>2,63</i>
	<b>2,68 kg</b>	<b>SNG</b>	<b>9,52%</b>	<b>0,25</b>		<b>2,91 kg</b>	<b>SNG</b>	<b>9,47%</b>	<b>0,28</b>
<i>Lait écrémé et pasteurisé</i>		<b>Protéines</b>	<b>3,86%</b>	<b>0,10</b>	<i>Lait écrémé et pasteurisé</i>		<b>Protéines</b>	<b>3,85%</b>	<b>0,11</b>
		<i>Lactose</i>	<i>4,90%</i>	<i>0,13</i>			<i>Lactose</i>	<i>4,90%</i>	<i>0,14</i>
		<i>Cendres</i>	<i>0,76%</i>	<i>0,02</i>			<i>Cendres</i>	<i>0,72%</i>	<i>0,02</i>

		<i>Eau</i>	90,48%	2,42
	<b>Fermentation à 43°C</b>			
2,68 kg		<b>SNG</b>	9,52%	0,25
		<b>Protéines</b>	3,86%	0,10
<i>Lait écrémé et pasteurisé</i>		Lactose	4,90%	0,13
		Cendres	0,76%	0,02
		<i>Eau</i>	90,48%	2,42
3,75E-05 kg				
<i>Ferments</i>				
2,68 kg		<b>SNG</b>	7,75%	0,21
		<b>Protéines</b>	3,90%	0,10
<i>Yogourt Conventionnel</i>		Lactose	3,50%	0,09
		Cendres	0,75%	0,02
		<i>Eau</i>	92,25%	2,47
	<b>Thermisation</b>			
2,68 kg		<b>SNG</b>	7,75%	0,21
		<b>Protéines</b>	3,90%	0,10
<i>Yogourt Conventionnel</i>		Lactose	3,50%	0,09
		Cendres	0,75%	0,02
		<i>Eau</i>	92,25%	2,47
	2,68 kg	<b>SNG</b>	7,75%	0,21
		<b>Protéines</b>	3,90%	0,10
	<i>Yogourt Conventionnel</i>	Lactose	3,50%	0,09
		Cendres	0,75%	0,02
		<i>Eau</i>	92,25%	2,47
	<b>Ultrafiltration Yogourt</b>			
2,68 kg		<b>SNG</b>	7,75%	0,21
		<b>Protéines</b>	3,90%	0,10
<i>Yogourt Conventionnel</i>		Lactose	3,50%	0,09
		Cendres	0,75%	0,02
		<i>Eau</i>	92,25%	2,47
		<b>FCV</b>	2,68	
	1,68 kg	<b>SNG</b>	4,21%	0,07
		<b>Protéines</b>	0,71%	0,01
	<i>Perméat UF YOG</i>	Lactose	2,83%	0,05
		Cendres	0,67%	0,01
		<i>Eau</i>	95,79%	1,61
	1,00 kg	<b>SNG</b>	14,21%	0,14
		<b>Protéines</b>	9,97%	0,10
	<i>Yogourt Concentré</i>	Lactose	3,41%	0,03
		Cendres	0,83%	0,01
		<i>Eau</i>	85,79%	0,86
	<b>Refroidissement</b>			

		<i>Eau</i>	90,53%	2,63
	<b>Ultrafiltration Lait</b>			
2,91 kg		<b>SNG</b>	9,47%	0,28
		<b>Protéines</b>	3,85%	0,11
<i>Lait écrémé et pasteurisé</i>		Lactose	4,90%	0,14
		Cendres	0,72%	0,02
		<i>Eau</i>	90,53%	2,63
		<b>FCV</b>	2,91	
	1,91 kg	<b>SNG</b>	5,47%	0,10
		<b>Protéines</b>	0,62%	0,01
	<i>Perméat LAIT</i>	Lactose	4,43%	0,08
		Cendres	0,42%	0,01
		<i>Eau</i>	94,53%	1,81
	1,00 kg	<b>SNG</b>	17,72%	0,18
		<b>Protéines</b>	11,09%	0,11
	<i>Lait concentré</i>	Lactose	5,24%	0,05
		Cendres	1,39%	0,01
		<i>Eau</i>	82,28%	0,82
	<b>Fermentation à 43°C</b>			
1,00 kg		<b>SNG</b>	17,72%	0,00
		<b>Protéines</b>	11,09%	0,11
<i>lait concentré</i>		Lactose	5,24%	0,05
		Cendres	1,39%	0,01
		<i>Eau</i>	82,28%	0,82
1,40E-05 kg	1,00 kg	<b>SNG</b>	13,62%	0,14
		<b>Protéines</b>	10,68%	0,11
<i>Ferments</i>		Lactose	1,49%	0,01
		Cendres	1,45%	0,01
		<i>Eau</i>	86,38%	0,86
		<b>Yogourt Grec</b>		
		<b>SNG</b>	13,62%	0,14
		<b>Protéines</b>	10,68%	0,11
	<i>Yogourt Grec</i>	Lactose	1,49%	0,01
		Cendres	1,45%	0,01
		<i>Eau</i>	86,38%	0,86
	<b>Thermisation</b>			
1,00 kg		<b>SNG</b>	13,62%	0,14
		<b>Protéines</b>	10,68%	0,11
<i>Yogourt Grec</i>		Lactose	1,49%	0,01
		Cendres	1,45%	0,01
		<i>Eau</i>	86,38%	0,86
	1,00 kg	<b>SNG</b>	13,62%	0,14
		<b>Protéines</b>	10,68%	0,11
	<i>Yogourt Grec</i>	Lactose	1,49%	0,01
		Cendres	1,45%	0,01
		<i>Eau</i>	86,38%	0,86
	<b>Refroidissement</b>			
1,00 kg		<b>SNG</b>	13,62%	0,14
		<b>Protéines</b>	10,68%	0,11
<i>Yogourt Grec</i>				

<b>1,00 kg</b> Yogourt Grec		<b>SNG</b>	<b>14,21%</b>	<b>0,14</b>	Lactose	1,49%	0,01	
		<b>Protéines</b>	<b>9,97%</b>	<b>0,10</b>	Cendres	1,45%	0,01	
		Lactose	3,41%	0,03	Eau	86,38%	0,86	
		Cendres	0,83%	0,01				
		Eau	85,79%	85,79%				
<b>1,00 kg</b> Yogourt Grec		<b>SNG</b>	<b>14,21%</b>	<b>0,14</b>	<b>1,00 kg</b> Yogourt Grec	<b>SNG</b>	<b>13,62%</b>	<b>0,14</b>
		<b>Protéines</b>	<b>9,97%</b>	<b>0,10</b>		<b>Protéines</b>	<b>10,68%</b>	<b>0,11</b>
		Lactose	3,41%	0,03		Lactose	1,49%	0,01
		Cendres	0,83%	0,01		Cendres	1,45%	0,01
		Eau	85,79%	0,86		Eau	86,38%	0,86

**Tableau 11 : Calculs des flux de références pour UF YOG**

UF YOG		Paramètres clés			Flux de Référence par UF	
ENTRANT	SORTANT					
<b>Production du Lait</b>						
	<b>3,02 kg</b> <i>Lait entier</i>				Production de lait à la ferme au Québec	3,02 kg
<b>Transport du Lait</b>						
<b>3,02 kg</b> <i>Lait entier</i>	<b>3,02 kg</b> <i>Lait entier</i>	distance de la ferme à l'usine	192	km	Quantité de transport (de la ferme à l'usine)	5,82E-01 tkm
		distance de l'usine à l'université	11	km	Quantité de transport (de l'usine à l'université)	3,32E-02 tkm
<b>Écrémage à froid</b>						
<b>3,02 kg</b> <i>Lait entier</i>		Masse volumique du lait entier	1032	g/l	Consommation énergétique électrique	4,30E-03 kWh
	<b>0,34 kg</b> <i>Crème</i>	débit du lait	0,64	m <sup>3</sup> /h		
	<b>2,68 kg</b> <i>Lait écrémé</i>	puissance écrémeuse	1,5	kWh		
<b>Homogénéisation</b>						
<b>2,68 kg</b> <i>Lait écrémé</i>		Masse volumique du lait écrémé	1036	g/l	Consommation énergétique électrique	5,17E-02 kWh
	<b>2,68 kg</b> <i>Lait homogénéisé</i>	débit du lait	0,2	m <sup>3</sup> /h		
		puissance homogénéisateur	4	kWh		
<b>Traitement thermique</b>						
<b>2,68 kg</b> <i>Lait homogenisé</i>		Masse volumique du lait écrémé	1036	g/l	Consommation d'eau du robinet	3,88E+01 l
		débit du lait	0,048	m <sup>3</sup> /h	Consommation énergétique électrique	1,61E+00 kWh
		puissance pasteurisateur	30	kWh		
	<b>2,68 kg</b> <i>Lait écrémé et pasteurisé</i>	débit d'eau froide	720	l/h		
<b>Fermentation à 43°C</b>						

2,68 kg <i>Lait écrémé et pasteurisé</i>		durée de fermentation	5	h	Consommation énergétique électrique	1,15E-02 kWh
		capacité du fermenteur	254	kg		
3,75E-05 kg <i>Ferments</i>	2,68 kg <i>Yogourt Conv</i>	puissance du fermenteur	0,218	kWh		

#### Thermisation

2,68 kg <i>Yogourt Conventionnel</i>		Masse volumique du yogourt conv.	1033	g/l	Consommation d'eau du robinet	0,0893 l
		débit du lait	0,048	m³/h	Consommation énergétique électrique	1,62E+00 kWh
	2,68 kg <i>Yogourt conv</i>	puissance pasteurisateur	30	kWh		
		débit d'eau froide	720	l/h		

#### Ultrafiltration Yogourt

2,68 kg <i>Yogourt Conventionnel</i>		Durée de l'UF	0,8	h	Consommation d'eau du robinet	4,00E+00 l
		Puissance de l'appareil	2,1	kWh	Consommation énergétique électrique	8,41E-02 kWh
		Débit d'eau chaude	100	l/h	Consommation électrique pour le chauffage de l'eau	3,60E-01 kWh
FCV	2,68	Poids de yogourt filtré	35,5	kg		
	1,68 kg <i>Perméat UF YOG</i>					
	1,00 kg <i>Yogourt Concentré</i>					

#### Refroidissement

1,00 kg <i>Yogourt Grec</i>		Masse volumique du yogourt grec	1040	g/l	Consommation énergétique électrique	1,92E-02 kWh
		consommation unité refroidissement	0,02	kWh/l		
	1,00 kg <i>Yogourt Grec</i>					

#### CIP

CIP UF YOG	consommation d'eau	2,2E-01	l	Consommation énergétique électrique	6,99E-04 kWh
	acide nitrique pour 1 kg de produit	7,5E-03	kg	acide nitrique	2,26E-02 kg
	Hypochlorite de sodium pour 1kg	6,3E-03	kg	Hypochlorite de sodium	1,90E-02 kg
	eau transformée en vapeur	2,0E-04	kg	Consommation d'eau du robinet	6,57E-01 l
	Consommation énergétique pour 1 kg	7,0E-04	kWh		

**Tableau 12 : Calculs des flux de références pour UF LAIT**

UF LAIT		Paramètres clés	Flux de Référence par UF	
ENTRANT	SORTANT			
<b>Production du Lait</b>				
	<b>3,27 kg</b> <i>Lait entier</i>			Production de lait à la ferme au Québec 3,27 kg
<b>Transport du Lait</b>				
<b>3,27 kg</b> <i>Lait entier</i>	<b>3,27 kg</b> <i>Lait entier</i>	distance de la ferme à l'usine 192 km		Quantité de transport (de la ferme à l'usine) 6,31E-01 tkm
		distance de l'usine à l'université 11 km		Quantité de transport (de l'usine à l'université) 3,60E-02 tkm
<b>Écrémage à froid</b>				
<b>3,27 kg</b> <i>Lait entier</i>		Masse volumique du lait entier 1032 g/l		Consommation énergétique électrique 4,66E-03 kWh
		débit du lait 0,64 m³/h		
	<b>0,37 kg</b> <i>Crème</i>	puissance écrémeuse 1,5 kWh		
	<b>2,91 kg</b> <i>Lait écrémé</i>			
<b>Homogénéisation</b>				
<b>2,91 kg</b> <i>Lait écrémé</i>		Masse volumique du lait écrémé 1036 g/l		Consommation énergétique électrique 5,61E-02 kWh
		débit du lait 0,2 m³/h		
	<b>2,91 kg</b> <i>Lait homogénéisé</i>	puissance homogénéisateur 4 kWh		
<b>Traitement thermique</b>				
<b>2,91 kg</b> <i>Lait homogenisé</i>		Masse volumique du lait écrémé 1036 g/l		Consommation d'eau du robinet 4,21E+01 l
		débit du lait 0,048 m³/h		
		puissance pasteurisateur 30 kWh		Consommation énergétique électrique 1,75E+00 kWh
	<b>2,91 kg</b> <i>Lait écrémé et pasteurisé</i>	débit d'eau froide 720 l/h		
<b>Ultrafiltration Lait</b>				
<b>2,91 kg</b> <i>Lait écrémé et pasteurisé</i>		Durée de l'UF 1,41 h		Consommation d'eau du robinet 1,31E+01 l
		Puissance de l'appareil 2,2 kWh		
		Débit d'eau chaude 100 l/h		Consommation énergétique électrique 2,88E-01 kWh
		Débit d'eau froide 720 l/h		
	<b>2,91 kg</b> <i>Lait filtré</i>	Poids de lait filtré 59,7 kg		Consommation électrique pour le chauffage de l'eau 1,05E+00 kWh
	<b>1,91 kg</b> <i>Perméat UF LAIT</i>			
	<b>1,00 kg</b> <i>Lait Concentré</i>			
<b>Fermentation à 43°C</b>				

1,00 kg <i>Lait concentré</i>		durée de fermentation	5 h	Consommation énergétique électrique	4,29E-03 kWh
		capacité du fermenteur	254 kg		
1,40E-05 kg <i>Ferments</i>	1,00 kg <i>Yogourt grec</i>	puissance du fermenteur	0,218 kWh		

#### Thermisation

1,00 kg <i>Yogourt grec</i>		Masse volumique du yogourt grec	1040 g/l	Consommation d'eau du robinet	9,69E-02 l
		débit du lait	0,048 m³/h		
	1,00 kg <i>Yogourt grec</i>	puissance pasteurisateur	30 kWh		
			débit d'eau froide	720 l/h	

#### Refroidissement

1,00 kg <i>Yogourt Grec</i>		Masse volumique du yogourt grec	1040 g/l	Consommation énergétique électrique	1,92E-02 kWh
		consommation unité refroidissement	0,02 kWh/l		
	1,00 kg <i>Yogourt Grec</i>				

#### CIP

<b>CIP UF LAIT</b>	consommation d'eau	2,2E-01 l	Consommation énergétique électrique	7,59E-04 kWh
	acide nitrique pour 1 kg de produit	7,5E-03 kg	acide nitrique	2,46E-02 kg
	Hypochlorite de sodium pour 1kg	6,3E-03 kg	Hypochlorite de sodium	2,06E-02 kg
	eau transformée en vapeur	2,0E-04 kg	Consommation d'eau du robinet	7,13E-01 l
	Consommation énergétique pour 1 kg	7,6E-04 kWh		

#### 4.5.1 Allocation des processus multifonctionnels

En partant du principe d'allocation selon l'approche recommandée par l'IDF décrite dans le chapitre 1.9.3, une allocation massique (matière sèche) a été calculée à partir des teneurs en solides des co-produits et des flux entrant et sortant des étapes d'écémage et d'ultrafiltration de chaque système.

Lors de l'écémage, la matière grasse du lait (3,94% m.g.) est séparée du reste des composants par centrifugation. En théorie l'étape d'écémage permet de retirer 3,88% de m.g. du lait, mais pour les calculs il a été considéré que cette étape retire le total de la matière grasse.

Les calculs pour les facteurs d'allocation sont ceux présentés dans le Tableau 13.

**Tableau 13 : calcul des facteurs d'allocation**

Source : adapté de (64)

<b>Entrant A :</b>	<b>Coproduit B :</b>	<b>Coproduit C :</b>
teneur en solides : $TS_a$	teneur en solides : $TS_b$	teneur en solides : $TS_c$
Quantité : $M_a$	Quantité : $M_b$	Quantité : $M_c$

$$\text{Facteur d'allocation du coproduit B} = \frac{TS_b \times M_b}{TS_b \times M_b + TS_c \times M_c}$$

$$\text{Facteur d'allocation du coproduit C} = \frac{TS_c \times M_c}{TS_b \times M_b + TS_c \times M_c}$$

Par définition, la somme des 2 facteurs d'allocation est égale à 1.

$$\text{Les masses doivent se conserver : } \begin{cases} TS_a \times M_a = TS_b \times M_b + TS_c \times M_c \\ M_a = M_b + M_c \end{cases}$$

Les résultats des facteurs d'allocation massique sont montrés dans le Tableau 14.

**Tableau 14 : Allocation massique sur base de matière sèche pour les étapes d'écémage et d'ultrafiltration des deux systèmes**

Étape	<b>[UF YOG]</b>					
	<b>Écémage</b>			<b>Ultrafiltration</b>		
	<i>Entrée</i>	<i>Sortie</i>		<i>Entrée</i>	<i>Sortie</i>	
	<b>Lait entier</b>	<b>Lait écémé</b>	<b>Crème</b>	<b>Yogourt Conv.</b>	<b>Perméat YOG</b>	<b>Yogourt concentré</b>
Teneur en solides (%)	13,46%	9,52%	44,52%	7,75%	4,21%	14,21%
Quantité (kg)	3,02	2,68	0,34	2,68	1,68	1,00
Quantité solides (kg)	0,41	0,25	0,15	0,21	0,07	0,14
<b>Facteur d'allocation</b>		<b>62,74%</b>	<b>37,26%</b>		<b>33,19%</b>	<b>66,81%</b>

[UF LAIT]						
Étape	Écrémage			Ultrafiltration		
	Entrée	Sortie		Entrée	Sortie	
	Lait entier	Lait écrémé	Crème	Lait écrémé	Perméat LAIT	Lait concentré
Teneur en solides (%)	13,41%	9,47%	44,47%	9,47%	5,47%	17,72%
Quantité (kg)	3,27	2,91	0,37	2,91	1,91	1,00
Quantité solides (kg)	0,44	0,28	0,16	0,28	0,10	0,18
<b>Facteur d'allocation</b>		<b>62,64%</b>	<b>37,36%</b>		<b>37,04%</b>	<b>62,96%</b>

#### 4.5.2 Données disponibles

La fabrication des yogourts concentrés au laboratoire pilote a été effectuée à partir de lait écrémé et pasteurisé acheté chez Natrel (Québec). Les données du bilan de matière avant l'étape du traitement thermique ont été tirées de la littérature.

Les calculs de flux de référence ont été effectués en prenant en compte le contexte du laboratoire pilote (paramètres clés déterminés pendant la phase d'expérimentation) dont les équipements ne sont pas connectés entre eux. Par conséquent la consommation énergétique du pompage du lait qui a lieu dans les usines de transformation laitière entre une étape et l'étape suivante n'est pas considérée dans les calculs.

Les données de consommation d'énergie utilisées dans les calculs des flux de référence des étapes : écrémage, homogénéisation, traitement thermique, thermisation, et fermentation ont été extraits des manuels techniques des machines du laboratoire pilote. La consommation énergétique de l'étape d'ultrafiltration a été réalisée en mesurant in situ régulièrement l'intensité et le voltage de la pompe d'ultrafiltration, puis elle a été calculée selon les formules décrites dans la partie 3.3.6. La production de chaleur a été considérée comme provenant d'énergie électrique.

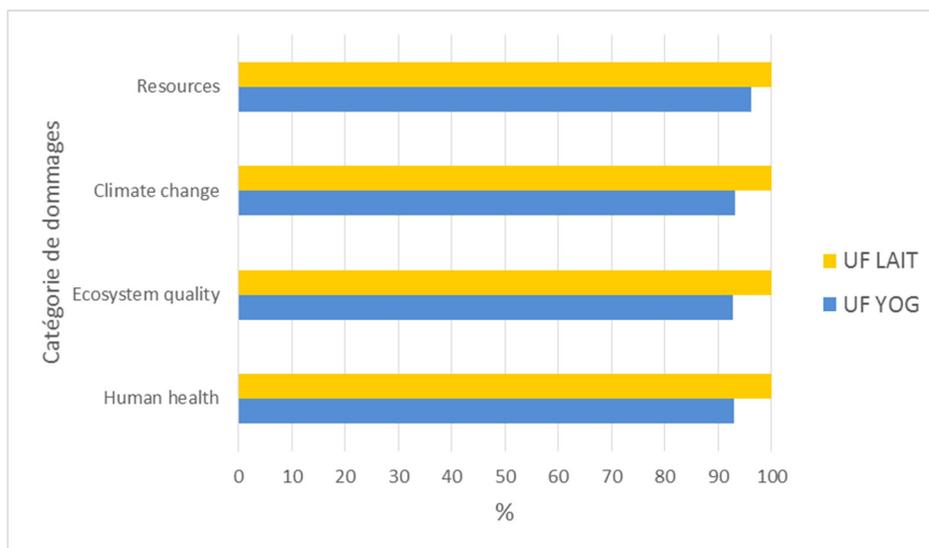
Le Tableau 15 présente les données Ecoinvent considérées pour la modélisation de cette étude.

**Tableau 15 : Données Ecoinvent utilisées pour la modélisation**

<b>Processus inclus</b>	<b>Données / modélisation / source</b>
<b>Données communes pour l'usine</b>	
Électricité	Electricity, low voltage {CA-QC}  market for   Alloc Def, U
Eau	Tap water {CA-QC}  market for   Alloc Def, U
CIP	
Acide nitrique	Nitric acid, without water, in 50% solution state {GLO}  market for   Alloc Def, U plus entrant d'eau de dilution en quantité suffisante (tap water)
Hypochlorite de sodium	Sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state {GLO}  market for   Alloc Def, U plus entrant d'eau de dilution en quantité suffisante (tap water)
<b>Données communes pour la fabrication des yogourts</b>	
Production du lait	Cow milk {CA-QC}  milk production, from cow   Alloc Def, U
Transport du lait	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6, GLO
Ferments lactiques	Chemical, organic {GLO}  market for   Alloc Def, U
<b>Eaux usées et Analyse de sensibilité sur les perméats</b>	
Traitement des eaux-usées	Wastewater treatment facility, capacity 1.1E10l/year {GLO}  market for   Alloc Def, U

#### 4.6 Résultats : impacts environnementaux des deux systèmes de fabrication de yogourt

Les résultats de la comparaison des impacts des deux systèmes, incluant la production et le transport du lait cru, sont présentés dans les schémas ci-dessous par catégories de dommages. Une allocation massique sur la base de la matière sèche a été effectuée lors des deux étapes écrémage et ultrafiltration.

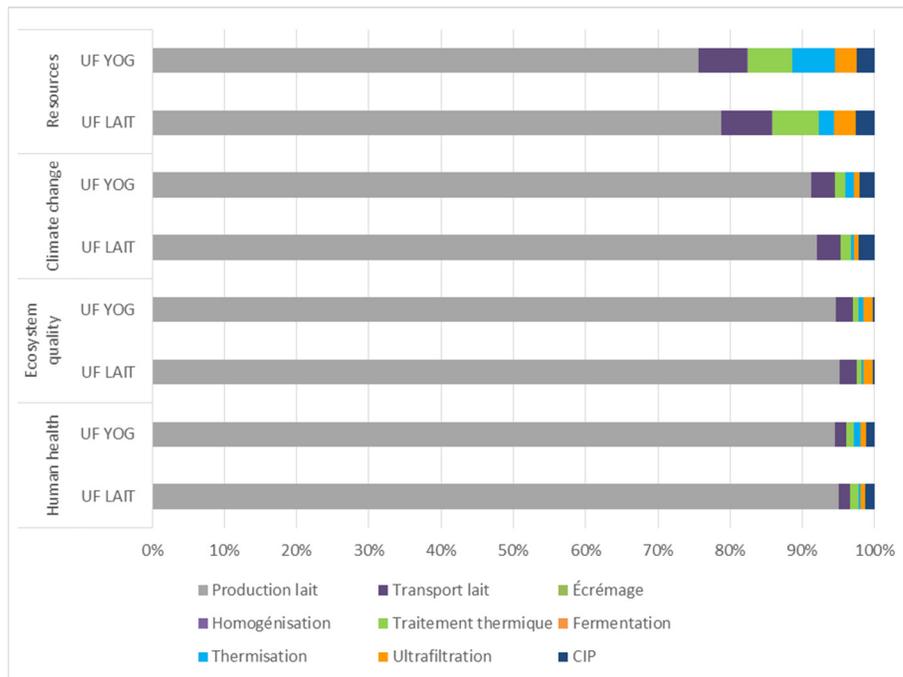


**Figure 12 : Comparaison des impacts des deux systèmes selon les catégories de dommages (allocation massique)**

La Figure 12, où les impacts pour UF LAIT ont été ramenés à 100%, permet de comparer UF LAIT et UF YOG. Cette figure montre que UF LAIT présente un impact supérieur compris entre 3,8% et 7,2% par rapport à UF YOG dans les 4 catégories de dommages.

#### 4.6.1 Contributions aux dommages par étape de fabrication pour chaque procédé de référence

Suite à ce résultat global, une présentation plus détaillée se trouve dans la Figure 13 ci-dessous qui découpe les catégories de dommages selon 3 étapes principales : production du lait, transport du lait, et transformation, cette dernière incluant la totalité des étapes de fabrication des yogourts. Dans cette figure, l'ensemble des impacts a été rapporté à 100%, à la fois pour UF LAIT et pour UF YOG, ce qui permet de voir quel sous-système est le plus impactant. Cependant cette représentation ne permet pas de comparer UF YOG et UF LAIT.



**Figure 13 : Contributions aux dommages par étape pour chaque système (allocation massique)**

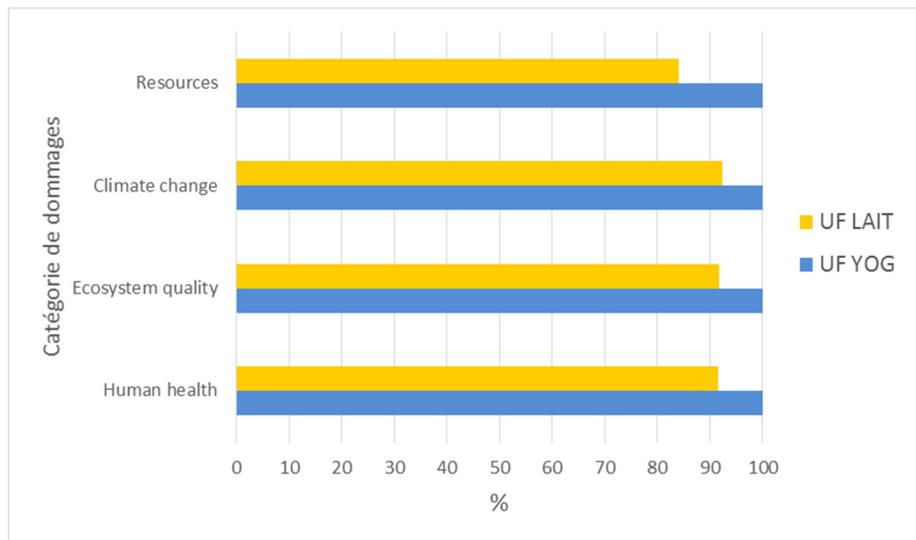
La production du lait représente l'impact majeur dans les deux systèmes analysés : 77% pour la catégorie de dommages « Ressources », et de 91% à 95% pour les 3 autres catégories. L'impact suivant provient de la transformation, et enfin les impacts de l'étape de transport correspondent en moyenne à 60% des impacts de l'étape de transformation. L'impact global (décrit dans la Figure 12) est donc à peu près proportionnel à la quantité de lait utilisé en entrée des systèmes, à cause des deux facteurs suivants : l'étape ayant le plus d'impact est celle de la production du lait, et UF LAIT utilise 8% plus de lait en entrée que UF YOG (pour rappel, lors de l'étape d'ultrafiltration, le facteur de concentration volumique (FCV) obtenu au laboratoire n'est pas le même dans les deux systèmes).

Dans les parties suivantes, pour permettre de comparer plus pertinemment chaque étape effectuée en laboratoire, les étapes de production et de transport ne seront plus prises en compte.

#### 4.6.2 Comparaison des impacts des deux systèmes de référence par catégorie de dommages sans transport ni production

Lorsque les étapes de production et de transport du lait ne sont plus prises en compte et que seul le sous-système transformation est analysé, la situation s'inverse (voir la Figure 14) et UF YOG a plus d'impacts (de 7% à 16% selon les 4 catégories de dommages) que UF LAIT, alors que UF LAIT utilise encore 8% plus de lait en entrée que UF YOG.

Afin de comprendre cette différence, une comparaison des systèmes détaillée par étape de fabrication se trouve dans les paragraphes suivants.



**Figure 14 : Comparaison des impacts des deux systèmes par catégorie de dommages, sans production ni transport du lait (allocation massique)**

À l'échelle du sous-système transformation, UF YOG a plus d'impact, même si cela n'est pas le cas pour toutes les étapes.

On trouve en effet 2 types d'étapes (voir Figure 15), comme détaillé dans le paragraphe suivant :

- Celles où UF YOG a un impact plus important (car il y a environ 3 fois plus de lait en entrée pour ces étapes, de par la nature des procédés) :  
Fermentation, thermisation.
- Celles où UF YOG a un impact plus faible (car il y a environ 8% moins de lait en entrée pour ces étapes, à cause de la différence du FCV) :  
Écrémage, homogénéisation, traitement thermique, ultrafiltration, CIP.

La principale différence d'impacts entre les deux procédés s'explique par le fait que pour UF LAIT la thermisation s'effectue sur le yogourt concentré, donc sur une quantité presque 3 fois inférieure comparativement au procédé UF YOG. Cette différence entre les deux procédés permet donc à UF LAIT de présenter dans le sous-système transformation moins d'impact que UF YOG, malgré une plus grande quantité de lait en entrée.

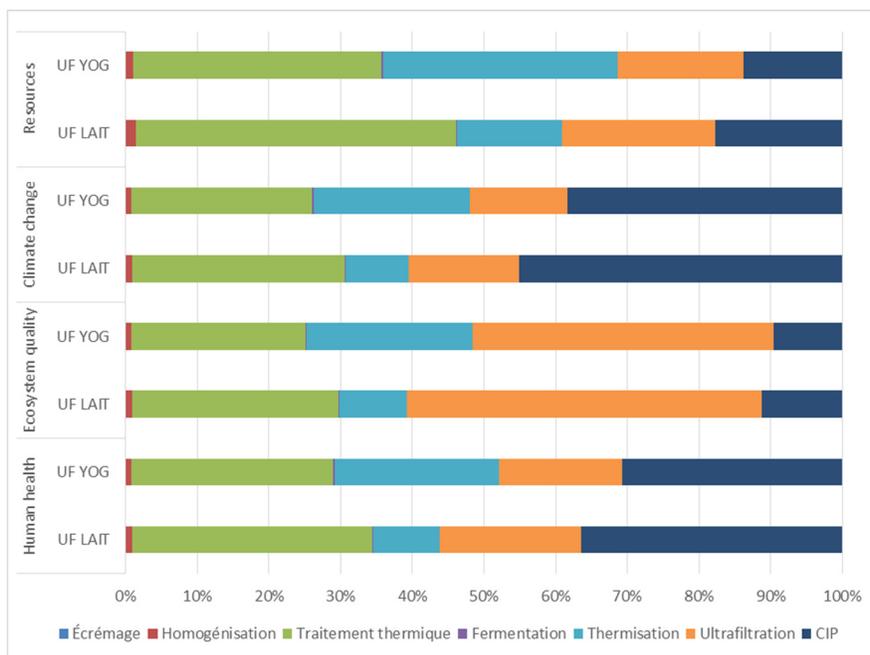
#### 4.6.3 Contributions aux dommages de chaque étape des deux systèmes de référence, sans production ni transport

La Figure 15 présente l'impact de chaque étape de fabrication sur les 4 catégories d'impacts. L'ensemble des impacts a été rapporté à 100%, à la fois pour UF LAIT et pour UF YOG, ce qui permet de voir quel sous-système est le plus impactant. Cependant cette représentation ne permet pas de comparer UF YOG et UF LAIT.

Pour UF YOG, les impacts sont causés à parts presque égales par les 4 autres étapes : traitement thermique (de 24% à 35% selon la catégorie de dommages), thermisation (22% à 33%), ultrafiltration (14% à 42%), et CIP (10% à 38%).

Pour UF LAIT, les impacts sont causés par les étapes de traitement thermique (de 29% à 45% selon la catégorie de dommages), de CIP (11% à 45%), d'ultrafiltration (15% à 49%), et de thermisation (9% à 15%).

L'étape d'écémage (0,05% à 0,08%) et l'étape de fermentation (0,07% à 0,13%) ont un impact négligeable par rapport aux autres étapes, quelle que soit la catégorie d'impact. De même, l'étape d'homogénéisation (0,8% à 1,3%) a un impact très faible.



**Figure 15 : Contributions aux dommages par étape de fabrication sans production et transport**

#### 4.7 Conclusion sur l'ACV comparative des systèmes de référence décrits

Les résultats montrent que lors d'une approche cycle de vie pour analyser les impacts potentiels des deux procédés de fabrication les résultats sont inversés lorsque l'analyse se restreint uniquement au sous-système de transformation.

Dans l'ensemble du cycle de vie, en prenant en compte la production, le transport du lait et la transformation, le procédé UF LAIT présente un impact majeur, dû au fait qu'il y a environ 8% en plus de lait en entrée que pour UF YOG (cela est dû au fait que le FCV obtenu au laboratoire est différent entre UF LAIT et UF YOG). Les résultats s'inversent lorsque seule l'étape de transformation est analysée : le procédé UF YOG présente un impact supérieur, dû au fait que les étapes de thermisation et de fermentation sont effectuées sur une quantité de lait presque trois fois supérieure, étapes nécessitant de l'énergie électrique pour le chauffage du produit. L'emplacement de cette opération unitaire, selon le choix du type de procédé, permet de définir l'impact global des deux systèmes.

Il serait intéressant de réaliser une analyse à partir de données obtenues avec un FCV égal dans les deux procédés. Dans ce cas théorique, la quantité de lait en entrée serait identique pour UF YOG et UF LAIT. L'étape dominant l'ensemble de l'ACV, la production du lait, et l'étape de transport auraient donc exactement le même impact dans les deux procédés. La seule différence d'impact entre les deux procédés proviendrait des étapes de la transformation, dans lesquelles l'impact serait plus grand pour UF YOG que pour UF LAIT, dû au fait que pour UF YOG, il y aurait encore trois fois plus de lait en entrée pour les étapes de fermentation et thermisation, étapes consommatrices d'énergie. Au final, sur l'ensemble de l'ACV, UF YOG présenterait donc un impact majeur que UF LAIT.

L'hypothèse de l'étude serait donc validée sous condition : le choix du procédé de fabrication du yogourt concentré utilisant l'ultrafiltration du lait avant fermentation (UF LAIT) permettrait une réduction des impacts environnementaux liés à la fabrication industrielle actuelle du yogourt grec, à condition que le facteur de concentration volumique (FCV) soit identique entre les deux procédés.

## 4.8 Analyses de sensibilité

Afin de mesurer l'influence des données sur les résultats de chaque dommage, la partie suivante présente les analyses de sensibilités effectuées : un premier scénario dans lequel l'allocation massique a été remplacée par une allocation économique sur la crème et les perméats, en prenant en compte le prix des composants du lait ; un deuxième scénario dans lequel les perméats UF YOG et UF LAIT ont été considérés comme des déchets.

Pour ces deux analyses de sensibilité, une ACV complète est effectuée. Par la suite, comme les différences par rapport à l'ACV précédente (allocation massique) ont lieu uniquement dans les étapes de transformation, une analyse du sous-système transformation est effectuée à part.

### 4.8.1 Allocation économique sur la crème et les perméats

Contrairement au calcul pour l'allocation massique, qui était basée sur le poids de matière sèche des produits (lait, crème, yogourt), le calcul pour l'allocation économique est effectué en fonction du prix des produits sortants des deux procédés multifonctionnels.

Les prix des co-produits sont basés sur les valeurs de juillet 2014 fourni par les Producteurs de Lait du Québec (83) comme indiqué dans le Tableau 16.

**Tableau 16 : prix payé à la production des substances laitières (PLQ)**

Matière grasse (\$/kg)	Protéine (\$/kg)	Lactose et autres solides (\$/kg)
9,8	9,6	1,8

Ce prix est donc en fonction de la composition de chaque produit, et dépend principalement de la composition en matière grasse (pour la crème) et en protéine (pour le yogourt).

Par conséquent, l'allocation économique est effectuée pour l'étape d'écémage selon la comparaison entre le prix de la crème et celui du lait entier cru, et pour l'étape d'ultrafiltration entre le prix du yogourt conventionnel et celui du yogourt concentré.

Les prix sont détaillés dans le Tableau 17 et l'allocation économique est effectuée dans le Tableau 18 . L'hypothèse sous-jacente des facteurs présentés dans ces tableaux est que la totalité des composants des deux types de perméats sont valorisés.

**Tableau 17 : prix estimé des produits sortants des systèmes**

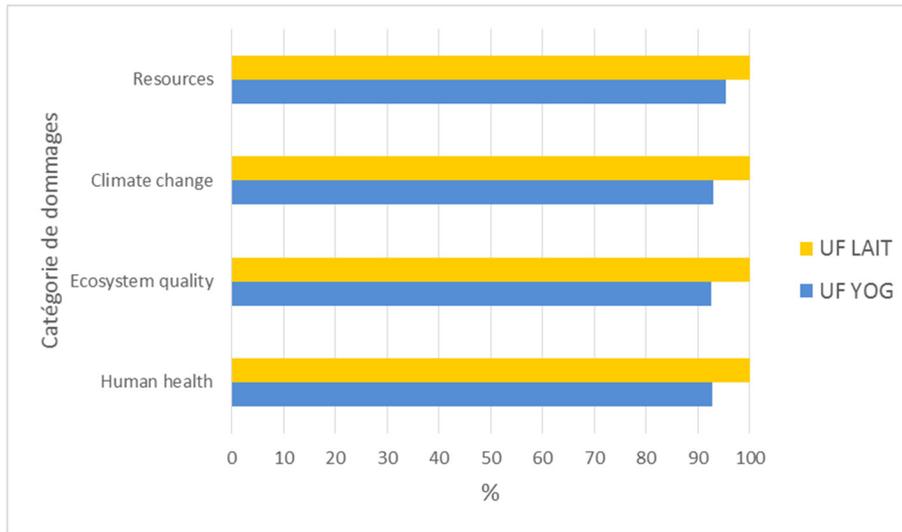
	Composant				Prix pour 1 kg
	m.g	Protéines	Lactose	Cendres	
<b>Lait entier cru</b>	3,94%	3,86%	4,90%	0,76%	0,86 \$
<b>Crème</b>	35,00%	3,86%	4,90%	0,76%	3,90 \$
<b>Lait écrémé</b>	0,00 %	3,86%	4,90%	0,76%	0,47 \$
<b>Yogourt</b>					
<b>conventionnel</b>	0,00%	3,90%	3,50%	0,75%	0,45 \$
<b>Yogourt concentré</b>	0,00%	9,97%	3,41%	0,83%	1,03 \$
<b>Lait concentré</b>	0,00%	11,09%	5,24%	1,39%	1,18 \$
<b>Perméat YOG</b>	0,00%	0,71%	2,83%	0,67%	0,13 \$
<b>Perméat LAIT</b>	0,00%	0,62%	4,43%	0,42%	0,15 \$

**Tableau 18 : Allocation économique pour les étapes d'écémage et d'ultrafiltration des deux procédés**

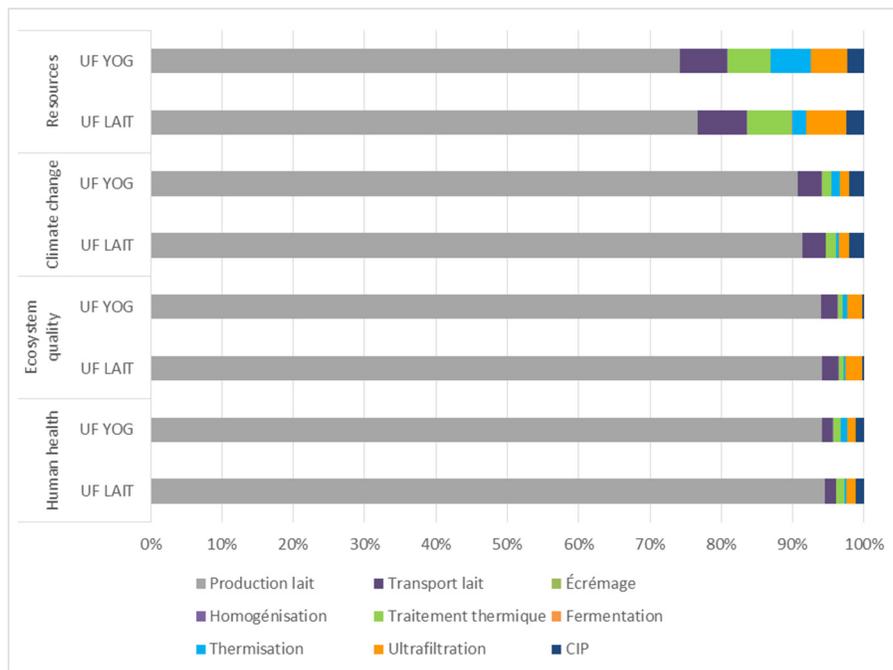
<b>[UF YOG]</b>						
<b>Étape</b>	<b>Écrémage</b>			<b>Ultrafiltration</b>		
	<i>Entrée</i>	<i>Sortie</i>		<i>Entrée</i>	<i>Sortie</i>	
	<b>Lait entier</b>	<b>Lait écrémé</b>	<b>Crème</b>	<b>Yogourt Conv.</b>	<b>Perméat YOG</b>	<b>Yogourt concentré</b>
Quantité (kg)	3,02	2,68	0,34	2,68	1,68	1,00
Prix (\$)	2,59 \$	1,26\$	1,33 \$	1,21\$	0,22\$	1,03\$
<b>Facteur d'allocation</b>		<b>48,81%</b>	<b>51,19%</b>		<b>18,22%</b>	<b>85,63%</b>

<b>[UF LAIT]</b>						
<b>Étape</b>	<b>Écrémage</b>			<b>Ultrafiltration</b>		
	<b>Entrée</b>	<b>Sortie</b>		<b>Entrée</b>	<b>Sortie</b>	
	<b>Lait entier</b>	<b>Lait écrémé</b>	<b>Crème</b>	<b>Lait écrémé</b>	<b>Perméat LAIT</b>	<b>Lait concentré</b>
Quantité (kg)	3,27	2,91	0,37	2,91	1,91	1,00
Prix (\$)	2,81 \$	1,37\$	1,44 \$	1,37 \$	0,28\$	1,18 \$
<b>Facteur d'allocation</b>		<b>48,73%</b>	<b>51,27%</b>		<b>20,45%</b>	<b>86,55%</b>

La Figure 16 présente, comme dans l'ACV précédente, la comparaison entre UF YOG et UF LAIT, selon les catégories de dommages, basée cette fois-ci sur l'allocation économique, en incluant la production, le transport et la transformation du lait. UF LAIT a encore plus d'impact que UF YOG. Cette différence d'impact s'explique à nouveau par la prépondérance de l'étape de production, comme indiqué dans la Figure 17, présentant la contribution du cycle de vie au complet.

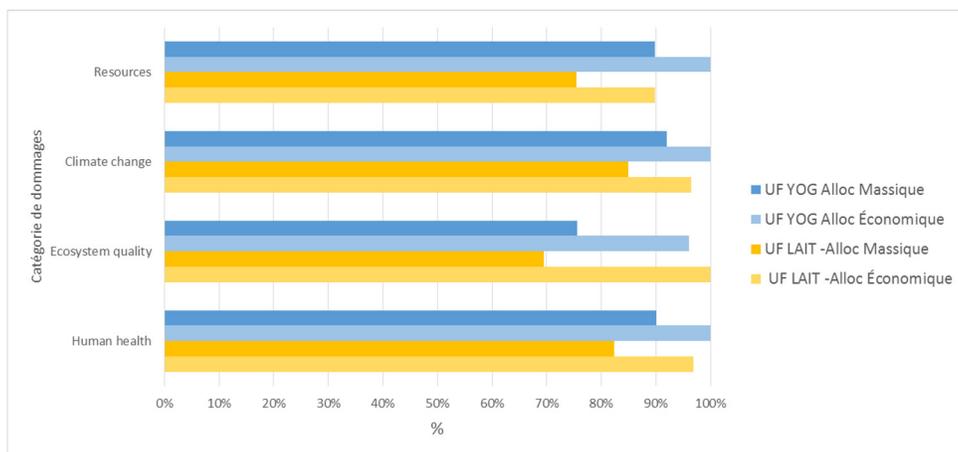


**Figure 16 : Comparaison des impacts des deux systèmes selon les catégories de dommages (allocation économique)**



**Figure 17 : Comparaison des contributions aux dommages par étape pour chaque système (allocation économique)**

La Figure 18 présente une comparaison de l'analyse de sensibilité entre l'allocation massique basée sur le contenu en matière sèche et l'allocation économique basée sur le prix de marché des composants des coproduits.



**Figure 18: Comparaison allocation massique vs allocation économique pour les deux procédés, sans production ni transport**

En effectuant cette allocation économique, les impacts pour UF LAIT et UF YOG sont plus importants que lors de l'allocation massique : 15% de plus pour UF LAIT et 24% de plus pour UF YOG. La différence la plus importante se trouve dans la catégorie de dommage «Ecosystem Quality» avec 27% de plus pour UF LAIT et 44% de plus pour UF YOG.

Les seules étapes qui sont différentes entre l'allocation massique et l'allocation économique, sont les 2 étapes dans lesquelles il y a une allocation : l'écémage et l'ultrafiltration.

Une analyse étape par étape fait ressortir deux points importants :

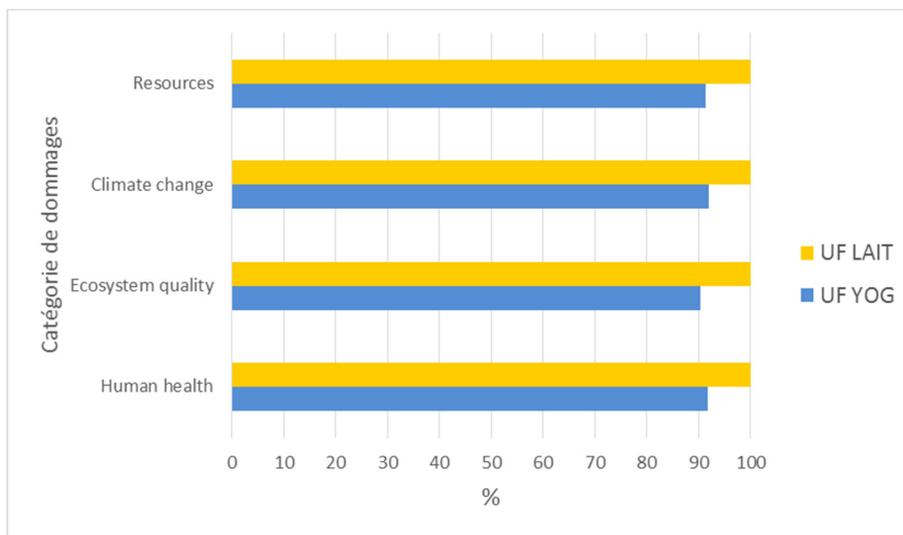
- Pour l'étape d'écémage, les impacts de l'allocation économique représentent 60% de ceux de l'allocation massique, et ce à la fois pour UF YOG et UF LAIT et pour les 4 catégories de dommages. Cette différence s'explique car le coût de la crème (qui est un produit sortant de cette étape du système de chaque procédé) est plus élevé que le coût du lait.
- Pour l'étape d'ultrafiltration, à l'inverse, les impacts de l'allocation économique sont plus élevés que ceux de l'allocation massique (65% plus grand, pour UF LAIT et UF YOG). En effet, le coût du yogourt concentré est plus élevé que celui du yogourt conventionnel pour le même poids, à cause de son contenu plus élevé en protéines.

Au total, comme l'impact de l'étape d'écémage est presque négligeable par rapport à celui de l'étape d'ultrafiltration, l'allocation économique a plus d'impact que l'allocation massique, à la fois pour UF YOG et UF LAIT.

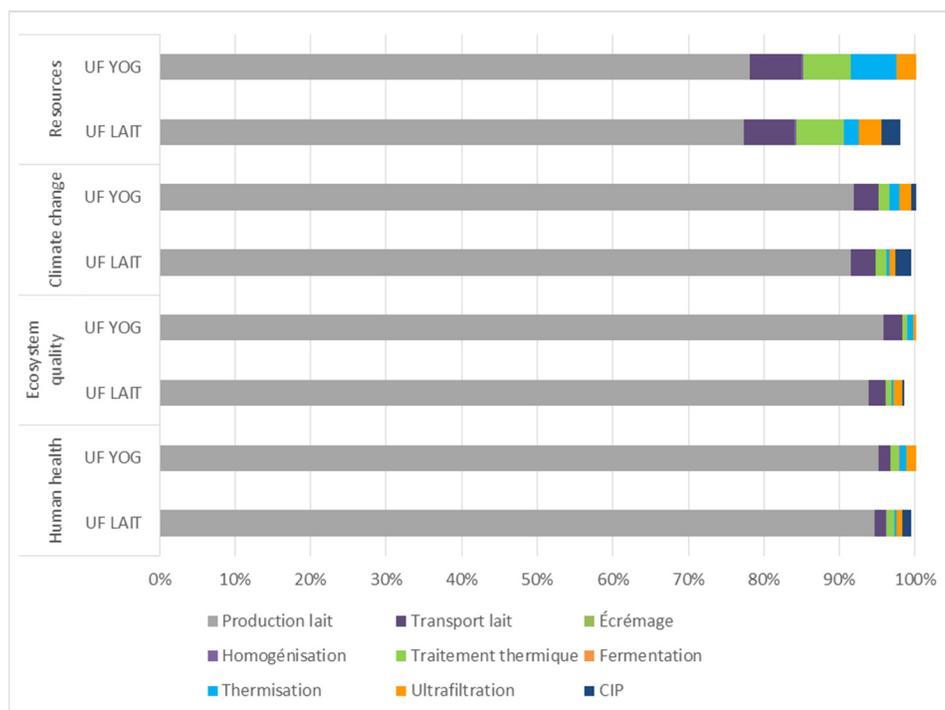
#### 4.8.2 Allocation : perméat acide considéré comme déchet

L'analyse de sensibilité en considérant le perméat de UF YOG comme déchet, équivaut à associer un facteur d'allocation de zéro à ce perméat, car il est considéré comme un déchet non valorisable : dans la modélisation il est déversé directement dans les drains avec les eaux usées. À l'opposé un facteur d'allocation massique est effectué sur le perméat UF LAIT.

La Figure 19 présente la comparaison entre UF YOG et UF LAIT, selon les catégories de dommages sur l'ensemble de l'ACV (production, transport et transformation du lait). Cette fois encore, UF LAIT a plus d'impact que UF YOG. Cette différence d'impact s'explique à nouveau par la prépondérance de l'étape de production. Lors de cette analyse de sensibilité la seule étape qui diffère est l'étape d'UF or celle-ci présente une contribution très faible sur le cycle de vie au complet. (Voir Figure 20)



**Figure 19 : Comparaison des impacts des deux systèmes selon les catégories de dommages (perméat UF YOG déchet)**



**Figure 20 : Comparaison des contributions aux dommages par étape pour chaque système (perméat UF YOG déchet)**

#### 4.8.3 Conclusion sur les analyses de sensibilité

Les impacts engendrés par l'étape production dominent l'ensemble des impacts du cycle de vie, quel que soit l'analyse de sensibilité choisie.

Dans le cas de l'allocation économique, pour le sous-système transformation, la fabrication du yogourt concentré utilisant l'ultrafiltration du lait avant fermentation permet une réduction des impacts environnementaux sauf pour les impacts sur la qualité des écosystèmes.

Dans la deuxième analyse de sensibilité, le perméat acide UF YOG est considéré comme un déchet. Celui-ci a un facteur d'allocation nul, alors qu'une allocation massique est à nouveau effectuée sur le perméat doux issu d'UF LAIT (les impacts de l'étape d'UF sont alloués au perméat doux, en proportion de sa masse). Les résultats varient peu pour cette analyse de sensibilité : UF LAIT continue à présenter l'impact le plus important car l'étape de transformation représente l'impact majeur, l'impact de l'étape d'UF (seule étape modifiée) est très faible par rapport à celui de l'étape de transformation.

## 4.9 Discussion sur les incertitudes et limites de l'étude

Les résultats de cette ACV contiennent un mélange de données obtenues à échelle pilote, et d'autres obtenues à partir d'estimations et d'adaptations de recherches bibliographiques. Certains paramètres ont une grande influence : le facteur de concentration (FCV) obtenu au laboratoire est différent pour chaque procédé, ce qui affecte la quantité de lait entrant dans chaque système étudié et influe directement les résultats. Si on suppose un FCV identique pour les deux systèmes (ce qui se rapproche de la littérature), cela implique que les quantités de lait en entrée sont identiques pour les deux systèmes. Il serait donc pertinent de réaliser une analyse de sensibilité avec un FCV identique à partir de données obtenues lors d'essais pilotes afin de mesurer le bénéfice sur le cycle de vie engendré par l'étape de transformation.

Les données utilisées lors de la modélisation des perméats considérés comme déchets ont été tirées des données générales de la base de données Ecoinvent sur le traitement des eaux usées municipales donnant des résultats peu représentatifs. Une adaptation de ces données en incluant la composition des eaux blanches pourrait être effectuée. En complément, une analyse comparative de deux systèmes de référence incluant, par une expansion de frontières, plusieurs scénarios de gestion des perméats ainsi que les différentes voies de valorisation serait très intéressante à réaliser. Il est important de tenir en compte que les choix des hypothèses notamment liés au chauffage de l'eau influencent directement les résultats de l'étude, car selon la source d'énergie renouvelable ou non renouvelable utilisée (gaz naturel, charbon,..) les résultats des impacts sur l'environnement ne seront pas les mêmes. Par conséquent la réalisation d'une analyse de sensibilité modifiant le mix électrique, choisissant ontarien au lieu de québécois permettrait de voir l'influence sur l'ensemble des résultats de l'ACV.

Afin de pouvoir conclure sur l'impact économique et environnemental des rejets actuels dans cette nouvelle analyse comparative, il serait pertinent de réaliser une extension des frontières en prenant en compte la composition des deux coproduits générés permettant d'évaluer les différents scénarios de valorisation de ces coproduits et pouvoir ainsi conclure laquelle des deux méthodes est la moins dommageable d'un point de vue environnemental.

## Chapitre 5. Conclusion générale

Les résultats obtenus dans ce projet ayant comme objectifs premiers la production de deux yogourts grecs de référence ainsi que la caractérisation de l'impact des choix technologiques d'UF sur l'utilisation de tous les constituants du lait montrent que lors la production à échelle pilote des deux yogourts de référence, le choix du procédé de concentration du lait avant l'étape de fermentation (UF LAIT) permet une meilleure utilisation de tous les constituants du lait. Comme les résultats du bilan de matière le vérifient, les deux procédés étudiés de fabrication de yogourt concentrés par UF génèrent des coproduits présentant des caractéristiques physicochimiques différentes. La méthode de production par le procédé UF YOG génère un perméat acide alors que la méthode UF LAIT génère un perméat doux. L'absence d'acide lactique dans le coproduit UF LAIT facilite la valorisation des solides du lait présents dans ce perméat, comme le lactose. Cet ingrédient laitier, représentant actuellement une valeur économique pour les transformateurs, serait un point clé lors du choix de méthode de fabrication de yogourt grec.

Par ailleurs le procédé UF LAIT a présenté une meilleure efficacité lors de l'étape de concentration. En effet, il a permis d'atteindre le FCV ciblé, et de plus les cycles de nettoyage effectués sur la membrane UF LAIT ont été optimaux pour retrouver les flux à l'eau initiaux. Cela a une répercussion positive sur la durée de vie de la membrane utilisée et apporte aussi une réduction de la consommation d'énergie lors des cycles de nettoyage par rapport à la membrane utilisée pour concentrer le lait fermenté, UF YOG.

La comparaison des impacts environnementaux des deux procédés étudiés était le troisième objectif de ce projet. Les résultats de l'ACV comparative démontrent que les impacts engendrés par l'étape production du lait dominant sur l'ensemble des impacts du cycle de vie, en représentant plus de 80% des impacts totaux. Par conséquent, les résultats avec le FCV obtenu lors des essais au laboratoire pilote montrent que le procédé UF LAIT présente une performance environnementale défavorable comparativement à UF YOG, ceci étant dû au fait qu'il y a 8% de lait en plus en entrée pour UF LAIT, car le FCV n'a pas été identique entre les deux procédés lors des essais.

En considérant L'ACV sur le sous-système «transformation du lait», les résultats ont montré que l'utilisation des ressources n'est pas la même pour les deux procédés : les

deux étapes fermentation et surtout thermisation présentent un impact plus grand sur le procédé UF YOG causé par le fait qu'il y a environ trois fois plus de volume de produits (lait ou yogourt) à l'entrée de ces étapes. Celles-ci ont donc un impact environ trois fois plus important pour UF YOG que pour UF LAIT, notamment au niveau de la consommation d'énergie électrique. Cependant, dans une perspective de l'ensemble du cycle de vie, le procédé UF LAIT ne permet pas une réduction des impacts environnementaux par rapport au procédé UF YOG, ce qui permet de rejeter l'hypothèse de recherche. La production de yogourt grec par UF LAIT engendre plutôt un déplacement d'impact de la transformation à la production du lait, à cause d'une plus grande consommation de lait, celle-ci étant responsable d'environ 80% des impacts sur le cycle de vie du yogourt grec.

Dans une perspective de recherches futures, afin de pouvoir conclure sur la performance environnementale de chaque procédé il serait intéressant de réaliser une ACV comparative des deux procédés à partir de données obtenues en utilisant une membrane de configuration mieux adaptée pour le procédé UF YOG, par exemple une membrane en céramique tubulaire, permettant ainsi d'obtenir des FCV équivalents entre les deux procédés. Ainsi, les impacts de l'étape de production de lait deviendraient identiques dans les deux procédés et cette nouvelle ACV permettrait de vérifier si la demande énergétique majeure du procédé UF YOG, liée au sous-système transformation, est toujours présente, ce qui devrait être le cas. L'hypothèse de l'étude (l'UF du lait avant fermentation permettrait une réduction des impacts environnementaux par rapport à l'UF après fermentation) serait donc validée dans ce cas où le facteur de concentration volumique (FCV) serait identique entre les deux procédés.

Finalement, afin de valider les résultats obtenus il serait également intéressant d'extrapoler l'étude pilote à une échelle industrielle en utilisant des données provenant d'entreprises laitières.

## Bibliographie

1. **Filtration GEA**. Application brief: Reverse osmosis of greek-style yoghurt whey. s.l. : Press release, Hudson WI, Aug. 30th., 2013.
2. **Elliott, Justin**. Whey Too Much: Greek Yogurt's Dark Side. <http://modernfarmer.com>. [En ligne] 22 mai 2013. <http://modernfarmer.com/2013/05/whey-too-much-greek-yogurts-dark-side/>.
3. **Nielsen National Research Group**. 2013.
4. **Laffin, Jones**. Greek yogurt waste 'acid whey' a concern for USDA. *Dairy Reporter*. [En ligne] US Department of Agriculture (USDA), Juin 2014. <http://www.dairyreporter.com/Processing-Packaging/Greek-yogurt-waste-acid-whey-a-concern-for-USDA-Jones-Laffin>.
5. [Scientific evidence about the role of yogurt and other fermented milks in the healthy diet for the Spanish population]. **Moreno, Cervera et Ortega**. s.l. : AULA MEDICA EDICIONES, 2013, Vol. Nov 1;28(6):2039-89.
6. **Fresko Yogurt Bar**. freskoyogurtbar.gr. [En ligne] 2012, Dionysiou Areopagitou 3, Athens 11742, Greece, 2011. <http://www.freskoyogurtbar.gr/en/product/yogurt>.
7. **Brothwell, Don R. et Brothwell, Patricia**. *Food in Antiquity: A Survey of the Diet of Early Peoples*. s.l. : JHU Press, 1969.
8. **Codex, stan 243**. Norme Codex pour les laits fermentés. [auteur du livre] International Food Standards. 2003.
9. **Proulx, Denise**. Journal Montréal - Actualité consommation . [En ligne] Nov 2014. <http://www.journaldemontreal.com/2014/11/29/le-yogourt-grec-la-vache-a-lait-des-producteurs-laitiers>.
10. **Les Producteurs de lait du Québec (PLQ)**. Lait.org. [En ligne] <http://lait.org/>.
11. **Tamine, A.Y. et Robinson, R.K**. Yoghurt: Science and Technology. 2007, pp. 32, 373-374.
12. **Chandan, Ramesh C. et Kilara, Arun**. *Manufacturing Yogurt and Fermented Milks*. s.l. : Wiley-Blackwell, 2013.
13. *Sensory properties and drivers of liking for Greek yogurts*. **Desai, N. T. , Shepard, L. et Drake, M. A.** 12, 2013, American Dairy Science Association®, Vol. 96, pp. 7454–7466.
14. **Cahuzac, Adrien**. Danone lance les yaourts grecs en France mais ne peut les appeler ni "yaourt", ni "grec". *L'usine nouvelle*. [En ligne] 2013.

- <http://www.usinenouvelle.com/article/danone-lance-les-yaourts-grecs-en-france-mais-ne-peut-les-appeler-ni-yaourt-ni-grec.N206573>.
15. **Commission canadienne du Lait**. <http://www.milkingredients.ca>. *Ingrédients laitiers - Yogourt*. [En ligne] Gouvernement du Canada, 2011.
  16. **Centre informatique sur la qualité des aliments** . *Composition du Yaourt*. [horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\_textes/.../31271.pdf] Paris : Cah. Nutr. Diét. XX1- Nutritionniste de l'ORSTOM, 1987. Vol. 5.
  17. **Walstra, Pieter, Wouters, Jan T. M. et Geurts, Tom J.** *Dairy Science and Technology Second Edition*. Boca Raton, FL 33487-2742 : CRC Press, 2006. Vol. Chapter 7 Heat treatment .
  18. **Amiot, Jean**. *Science et technologie du lait: transformation du lait*. [éd.] Fondation de Technologie Laitière du Québec. s.l. : Presses internationales Polytechnique, 2010. pp. 198-199, 205.
  19. **Luquet, François M.** *Produits dérivés des fabrications fromagères*. s.l. : Lavoisier, 1985. Vol. 2.
  20. *Manufacturing, properties and shelf life of labneh: a review*. **Nsabimana, Consolate, Bo, JIANG et Kossah, RIMA**. 2005, International Journal of Dairy Technology.
  21. **(IDF), International Dairy Federation**. International Dairy Federation (IDF). [En ligne] 1994. <http://www.fil-idf.org/Public/ColumnsPage.php?ID=23077>.
  22. **Novak, A.** Application of membrane filtration in the production of milk protein concentrates,. [auteur du livre] International Dairy Federation. Brussels : s.n., 1996, Vol. Bulletin 311.
  23. **Mulvihill, DM**. *Advanced dairy chemistry-1: Proteins*. 1992 pp. 369-404 - *Production, functional properties and utilization of milk protein*. s.l. : PF Fox, 1992.
  24. **Mulvihill, DM et Ennis, MP**. Functional milk proteins: production and utilization. *Advanced Dairy Chemistry—1 Proteins*. s.l. : P.F Fox, 2003.
  25. *Fermented milks and their future trends. Part II*. **Tamime, Adnan et Robinson, Richard**. 1987, Journal of Dairy Research .
  26. **Arla Foods**. Greek yogurt process promises an end to 1 million tons of acid whey . [arlafoodsingredients.com](http://www.arlafoodsingredients.com). [En ligne] [Citation : 25 Mai 2014.] <http://www.arlafoodsingredients.com/news/talking-point/greek-yogurt-process-promises-an-end-to-1-million-tons-of-acid-whey/>.
  27. *Filtration technology for concentrated yogurt*. **Tetra Pak; Rudolph, Dave**. 2014. Membrane technology forum.

28. *Rheological properties of concentrated yoghurt (Labneh)*. **OZER, B.H., et al.** 1997.
29. **Bazinet, L. et Castaigne, F.** Concepts de génie alimentaire. [éd.] Lavoisier. s.l. : Éditions TEC&DOC, 2011, pp. 462- 464, 467.
30. **Zena Membranes.** Zena Membranes. *Zena Membranes*. [En ligne] 1991. <http://www.zena-membranes.cz/>.
31. **Maubois, Jean-Louis.** *Le brevet MMV sur l'ultrafiltration*. Rennes : INRA, 2007.
32. **Pouliot, Yves.** Membrane processes in dairy technology- From a simple idea to worldwide panacea. *International Dairy Journal*. 2008, Vol. 18 (7) :735-740.
33. **Pak, Dave Rudolph - Tetra.** *Filtration Technology for Concentrated Yogurt*. Membrane Technology Forum : s.n., June 5, 2014.
34. **Mountain Filtration Systems, Inc.** Product Information.
35. **Tamine, A. Y., A.Y., et al.** *The production of "Labneh" by ultrafiltration: a new technology*. s.l. : Journal of the Society of Dairy Technology, 1989. pp. 35-39.
36. **Crini , Grégorio et Badot , Pierre-Marie.** Traitement et épuration des eaux industrielles polluées. Procédés membranaires, bioadsorption et oxydation chimique. s.l. : Presses universitaires de Franche-Comté, 2007, p. 77.
37. **Bouroche, Annik et Bars, Michèle Le.** *Techniques de séparation par membranes*. s.l. : INRA , 1994.
38. *Skim milk protein recovery and purification by ultrafiltration*. **Pompei, C., Resmini, P. et Peri, C.** 1973.
39. *Préparation de fromage à partir de "pré-fromage liquide" obtenu par ultrafiltration*. **Maubois, J.L et Mocquot, G.** 508, Rennes : s.n., 1971, pp. 495 - 533.
40. *RHEOLOGICAL PROPERTIES OF CONCENTRATED*. **Ozer, B.H, et al.** 1997, Journal of Texture Studies 29.
41. *The Behaviour of Starter Cultures in*. **Ozer , Barbaros H. et Robinson, Richard K.** s.l. : Academic Press, 1999.
42. **Tamime, A.Y.** Membrane processing - Dairy and beverages applications. 2013.
43. *Rheological and Sensory Properties of Yogurt from*. **Biliaderis, C. G. , Khan , M. M. et Blank, G.** 1991, Dairy Journal 2 (.).
44. **Croguennec, Thomas.** *Fondements physicochimiques de la technologie laitière*. Tec and Doc. 2008. p. 29.
45. *The effect of processing temperatures on the quality of labneh made by ultrafiltration*. **Tamime, AY, Davies, AS et Mahdi, HA.** 1991, Journal of the Society of Dairy Technology

46. **Kilara, Arun et Chandan, Ramesh C.** . Greek-style yogurt and related. [auteur du livre] Ramesh C. Chandan et Arun Kilara. *Manufacturing Yogurt and Fermented Milks*. 2013.
47. *Use of micellar casein concentrate for Greek-style yogurt*. **Bong, D. D. et Moraru, C. I.** 2014, American Dairy Science Association.
48. **Moletta, René.** *Gestion des problèmes environnementaux dans les industries agroalimentaires*. s.l. : Lavoisier, 2006.
49. **Bourgeois, C.M. et Larpent, J.P.** Microbiologie alimentaire, Aliments fermentés et fermentations alimentaires. s.l. : TEC & DOC, 1996, 3.
50. **Ward, Loren et Christiansen, Earl.** *Fermented flavoring system derived from greek yogurt processing*. Irlande, 2013.
51. **Actu-environnement.** Dictionnaire Environnement. <http://www.actu-environnement.com/>. [En ligne] 2003 - 2015. [http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire\\_environnement/definition/analyse\\_du\\_cycle\\_de\\_vie\\_acv.php4](http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/analyse_du_cycle_de_vie_acv.php4).
52. **Jolliet, Oliver, Saadé, Myriam et Crettaz, Pierre.** Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan. s.l. : Presses polytechniques romandes, 2010, p. 3.
53. **Recyconsult.** Dictionnaire Environnement. [En ligne] 2010. [http://www.dictionnaire-environnement.com/analyse\\_du\\_cycle\\_de\\_vie\\_acv\\_ID706.html](http://www.dictionnaire-environnement.com/analyse_du_cycle_de_vie_acv_ID706.html).
54. **ISO-14040.** *Management environnemental -- Analyse du cycle de vie -- Principes et cadre*. 2006.
55. **Quantis.** Pensée cycle de vie. [En ligne] 2009. [http://www.quantis-intl.com/fr/pensee\\_cycle\\_de\\_vie.php](http://www.quantis-intl.com/fr/pensee_cycle_de_vie.php) .
56. **UVED.** Méthodologie de l'analyse du cycle de vie (ACV). [En ligne] Université Virtuelle Environnement et Développement Durable, 2012. [http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap03/co/ch03\\_020\\_acv\\_web.html](http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap03/co/ch03_020_acv_web.html).
57. *System boundaries and input data in consequential life cycle inventory analysis*. **Ekvall, Tomas et Weidema, Bo P.** . 3, mai 2004, The International Journal of Life Cycle Assessment, Vol. 6, pp. 161-171.
58. **ECO3e.** Outils d'Éco-conception – Analyse de Cycle de Vie. [En ligne] 2014. <http://eco3e.eu/boite-a-outils/acv/>.
59. **Avnir.** Plateforme pour l'analyse de cycle de vie. [En ligne] cd2e, 2013-2016. <http://avnir.org/FR/Logiciels-ACV-et-Base-de-donnees-264.html>.

60. **Ecoinvent Centre.** Ecoinvent Centre. [En ligne] Ecoinvent, 2015. [www.ecoinvent.org/database/database.html](http://www.ecoinvent.org/database/database.html).
61. **CIRAIG.** BD-ICV québécoise . [En ligne] Polytechnique Montréal, 2014. <http://www.ciraig.org/fr/bd-icv.php>.
62. **Orée, Association.** *Méthodologie de la démarche d'ACV*. Paris : s.n., 2009.
63. **Québec, Gouvernement du.** [En ligne] 2014. <http://www.fil-information.gouv.qc.ca/Pages/Article.aspx?idArticle=22112446840>.
64. **Federation, Bulletin International Dairy.** *A common carbon footprint approach for dairy. The IDF guide to standard lifecycle assessment methodology for the dairy sector* . Brussels : International Dairy Federation, 2010. 445/2010.
65. **Andrew J. Feitz, Sven Lundie , Gary Dennien, Marc Morain, Michael Jones.** Generation of an Industry-specific Physico-chemical Allocation Matrix. Application in the Dairy Industry and Implications for Systems Analysis. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Springer Link , 2007, Vol. 12, 2 pp 109-117.
66. **IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. Jolliet, Olivier , Margani, Manuele et Charles, Raphaël .** 6, November 2003, The International Journal of Life Cycle Assessment, Vol. 8, pp. 324-330.
67. **General Mills.** 2015.
68. **Ozer, B.H, et al.** Rheological Properties of concentrated Yoghurt. *Journal of Texture Studies*. 1997, Vol. Volume 29, 1, pages 67–79.
69. **Brazuelo, Agustin, Suárez, Elena et Riera, Francisco.** Protein-enriched yoghurt by ultrafiltration of skim-milk. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. John Wiley & Sons, Inc., 1995, Vol. 69, 3.
70. **Cheryan, Munir.** Ultrafiltration and Microfiltration Handbook. s.l. : CRC Press, 1998, Vol. 327-332.
71. **Moleta, René.** *Gestion des problèmes environnementaux dans les industries agroalimentaires*. s.l. : Lavoisier, 2006.
72. **Ageco, Groupe.** *Les faits saillants laitiers québécois*. s.l. : Groupe Ageco, 2013. 27e édition P 66-69.
73. **Nast, Condé.** Nutrition data dairy and egg products. [En ligne] [Citation : ] <http://nutritiondata.self.com/facts/dairy-and-egg-products/104/2>.
74. **(PLQ), Producteurs de lait du Québec.** *Le cycle de vie du lait* . s.l. : FPLQ, 2012. Page 19.

75. **Westfalia**. Manuel d'utilisation: Écrémeuse Westfalia Ril Purpose. Allemagne : s.n., 1961. Vol. Modèle MP 1254D. Lab Pilote - ULAVAL.
76. **GEA**. Manuel d'utilisation: Homogénéisateur GEA NIRO Soavi. Italia : Mechanical Equipment . Modèle NS2006H. Lab Pilote - ULAVAL .
77. **MicroThermics**. Manuel d'utilisation: Pasteurisateur HTST-UHT . Electra HVH 25HV Hybrid. Lab Pilote - ULAVAL .
78. **Sanyo**. Manuel d'utilisation: Incubateur Sanyo Cooled . MIR 253. Lab Pilote - ULAVAL .
79. **Inc, GEA Niro**. Manuel d'utilisation: unité de filtration . USA : s.n. Lab Pilote - ULAVAL .
80. **O'Keeffe, John**. *Milk Cooling*. s.l. : TEAGASC Training, TEAGASC Training, 2007.
81. **P.M. Tomasula, W.C.F. Yee , A.J. McAloon , D.W. Nutter , L.M. Bonnaille**. Computer simulation of energy use, greenhouse gas emissions and process economics of the fluid milk process. *Journal of dairy science* . 2013, Vol. 96, 5 pp. 3350-3368 .
82. **W.C. Yee, A. J. McAloon and P. M. Tomasula\***. *Manual for the Fluid Milk Process Model and Simulator*. US : Agricultural Reserarch Service - Department of Agriculture, 2013.
83. **Québec, Producteurs de Lait du**. Prix des substances laitières. [En ligne] Juillet 2014. <http://www.groupeageco.ca/fr/pdf/stat/PPF3.pdf>.
84. **Tyl, Benjamin**. Eco-efficience industrielle, Atteindre l'éco-efficience à travers l'éco-conception et l'écologie industrielle. s.l. : Remar, Réseau Énergie Environnement, 2011, pp. 1-71.
85. **Producteur laitiers du Canada**. Info PLC. 2013.
86. **Actu-environnement**. Définition du Développement Durable. [En ligne] 2006. [http://www.actu-environnement.com/ae/dossiers/dd/dd\\_definitions\\_1.php4](http://www.actu-environnement.com/ae/dossiers/dd/dd_definitions_1.php4).
87. **l'Agora, Encyclopédie de**. Dossier : écologie industrielle. [En ligne] 2012. [http://agora.qc.ca/documents/ecologie\\_industrielle--eco-efficience\\_par\\_environnement\\_quebec](http://agora.qc.ca/documents/ecologie_industrielle--eco-efficience_par_environnement_quebec).
88. **Gasiorowski-Denis, E**. Passer au vert - Nouvelle norme ISO sur l'évaluation de l'éco-efficacité pour de meilleurs résultats avec moins de déchets. s.l. : ISO, 2012.
89. **ISO**. À propos de l'ISO. [En ligne] 2014. <http://www.iso.org/iso/fr/about.htm>.
90. **Calcul des indicateurs de l'écoefficacit ** . *Table ronde nationale sur l'environnement et l' conomie*. Ottawa : Renouf Ltée, 2001. p. 17.

91. **Pabby, Anil K., Rizvi, Syed et Sastre, Ana Maria.** *Membranes Separation.* s.l. : CRC Press, 2008.

92. **Andrew J. Feitz<sup>1\*</sup>, Sven Lundie<sup>1</sup>, Gary Dennien<sup>2</sup>, Marc Morain<sup>2</sup> and Michael Jones<sup>2</sup>.** Generation of an Industry-Specific Physico-Chemical Allocation Matrix. *The international Journal of Life Cycle Assessment.* 2007, Vol. 12, Issue 2, pp 109-117.