



Étude du comportement rhéologique en digestion in vitro de systèmes modèles laitiers enrichis en fibres

Mémoire

Judith Lavoie

Maîtrise en Sciences et technologie des aliments
Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

© Judith Lavoie, 2013

Résumé

Ce projet visait à mesurer l'effet de l'enrichissement en polysaccharides d'une matrice laitière sur son comportement rhéologique en digestion in vitro. Le comportement rhéologique de solutions de protéines laitières (3,9%), de gomme xanthane (0,7%), de gomme de caroube (0,7%) et de leurs mélanges, acidifiés par HCl sous agitation, a été suivi durant une digestion in vitro. Le comportement de solutions de poudre de lait écrémé (3,5 et 4% de protéines) enrichies des mêmes polysaccharides (0,7%) et fermentées a aussi été suivi en digestion in vitro. Le mode d'acidification affectait le comportement rhéologique des solutions contenant des protéines. La viscosité des solutions a diminué en cours de digestion, à l'exception des solutions contenant protéines et gomme xanthane dont la viscosité augmentait de l'étape gastrique à l'étape intestinale. L'ajout de polysaccharides à une matrice laitière permettrait donc de moduler sa viscosité lors de la digestion et pourrait ainsi procurer des bénéfices physiologiques.

Abstract

This project aims to measure the effect of enrichment in polysaccharides of a dairy matrix on its rheological behaviour when subjected to in vitro digestion. The rheological behaviour of solutions containing milk protein (3,9%), xanthan gum (0,7%), carob gum (0,7%) and their binary or ternary mixtures, acidified by HCl with stirring, was followed during in vitro digestion. The rheological behavior of solutions of skimmed milk powder (3,5% and 4% of protein) enriched or not with same polysaccharides (0,7%) and fermented has also been followed during in vitro digestion. The mode of acidification affected the rheological behavior of solutions containing proteins. The viscosity of the acidified and fermented solutions decreased throughout digestion, except for the protein solutions containing xanthan gum for which viscosity increased at the transition from gastric to intestinal stage. Integration of polysaccharides to a dairy matrix would, therefore, modulate its viscosity during digestion and could provide physiological benefits.

Table des matières

Résumé.....	iii
Abstract.....	v
Table des matières	vii
Liste des tableaux.....	ix
Liste des figures	xi
Remerciements.....	xv
Avant-propos	xvii
Introduction.....	1
Chapitre 1 : Revue de Littérature.....	5
1.1 Satiété.....	5
1.2 Fibres et satiété	7
1.2.1 Définition des fibres.....	7
1.2.2 Mécanismes d’action des fibres	9
1.2.3 Quelques fibres visqueuses étudiées pour leur effet satiétogène	12
1.3 Comportements rhéologiques des solutions de fibres.....	12
1.3.1 Viscosité et gélification	12
1.3.2 Évolution de la viscosité en cours de digestion	13
1.3.3 Interactions entre polysaccharides	14
1.4 Fibres et produits laitiers.....	15
1.4.1 Produits laitiers et satiété	16
1.4.2 Défis liés à l’inclusion de fibres dans une matrice laitière fermentée	18
1.5 Hypothèse et objectifs.....	21
Chapitre 2 : Comportement rhéologique de polysaccharides alimentaires à différents pH..	23
2.1 Introduction.....	23
2.2 Matériel et méthode :	23
2.3 Résultats et discussion	25
Solutions simples	25
Solutions mixtes.....	28
2.4 Conclusion	31

Chapitre 3 : Inclusion de fibres dans une matrice laitière acidifiée ou fermentée : effet sur le comportement rhéologique en digestion <i>in vitro</i>	33
Résumé	34
3.1 Introduction	35
3.2 Matériel et méthodes	39
3.2.1 Ingrédients	39
3.2.2 Préparation des solutions.....	40
3.2.3 Acidification/Fermentation	41
3.2.4 Digestion <i>in vitro</i>	42
3.2.5 Comportement rhéologique des solutions acidifiées et fermentées	42
3.2.6 Analyses statistiques	43
3.3 Résultats et discussion.....	44
3.3.1 Étude du comportement rhéologique des solutions acidifiées au pH du yogourt et aux conditions simulant les étapes de digestion.....	44
3.3.2 Viscosité des solutions acidifiées à un taux de cisaillement de 30 s ⁻¹ aux conditions simulant la digestion.	52
3.3.3 Étude du comportement rhéologique des solutions fermentées aux conditions simulant les étapes de digestion	54
3.3.4 Viscosité des solutions fermentées à un taux de cisaillement de 30 s ⁻¹ aux conditions simulant la digestion.	61
3.4 Conclusion.....	63
Conclusion générale	65
Bibliographie.....	67
Annexe 1 : Modèle de digestion <i>in vitro</i> :.....	77
Annexe 2 : Valeurs de probabilité pour les effets de concentration de protéines et de formulation sur les solutions fermentées.....	79

Liste des tableaux

Tableau 1 : Concentration en fibres des ingrédients utilisés.	24
Tableau 2 : Concentration en fibres des solutions simples et mixtes utilisées	24
Tableau 3 : Viscosité à un taux de cisaillement de 30 s^{-1} des solutions de polysaccharides, seuls ou en mélange, à pH 6,6, 4,3, 2,0 et 6,0.....	27
Tableau 4 : Composition du CPL et de la PLÉ.....	39
Tableau 5 : Paramètres ¹ de la modélisation des courbes de viscosité des solutions acidifiées à chaque étape de la digestion.....	46
Tableau 6 : Viscosité (valeurs expérimentales) des solutions acidifiées à un taux de cisaillement de 30 s^{-1} aux étapes simulant les conditions de digestion.	53
Tableau 7 : Paramètres ¹ de la modélisation des courbes de viscosité des solutions fermentées à chaque étape de la digestion	57
Tableau 8 : Viscosité moyenne (valeurs expérimentales) des solutions fermentées à un taux de cisaillement de 30 s^{-1} aux étapes simulant les conditions de digestion.	62

Liste des figures

Figure 1 : Cascade de satiété de Blundell, modifiée par Mela.	5
Figure 2 : Courbes d'écoulement des solutions de polysaccharides seuls.....	26
Figure 3 : Courbes d'écoulement des solutions de polysaccharides en mélange.....	30
Figure 4 : Schéma présentant les étapes de la digestion in vitro.	44
Figure 5 : Courbe de viscosité des solutions acidifiées	47
Figure 6 : Courbes de viscosité des solutions fermentées.....	56

À mes parents

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier ma directrice, Mme Sylvie Turgeon, Ph.D., (Université Laval) et ma co-directrice, Mme Émilie Laurin, Ph.D., (Aliments Ultima inc.), sans qui ce projet n'aurait pas existé. Émilie a proposé le sujet et Sylvie a imaginé le concept à la base de l'étude. Merci de votre contribution, de votre soutien indéfectible et de votre patience.

Merci également à l'entreprise Aliments Ultima inc. pour la confiance témoignée et le financement d'une partie de cette recherche. Un merci particulier à Mme Stéphanie Bernard pour sa collaboration lors des essais pilotes.

Les journées de laboratoire auraient été plus pénibles sans la présence de Mme Diane Gagnon, professionnelle de recherche à l'Université Laval. Merci Diane pour ta générosité, ta disponibilité, ton support précieux et ta gaieté.

J'adresse également des remerciements à mon équipe de recherche pour sa collaboration tout au long de ce projet. Un merci particulier à Mme Laurie-Eve Rioux, Ph.D., qui a revu et commenté l'article inclus dans ce mémoire.

Il n'y a pas de mots assez forts pour remercier mes parents qui m'ont soutenue et encouragée durant mes études. Sans vous, ce projet de retour aux études ne se serait pas réalisé.

Ces travaux ont été financés en partie par Aliments Ultima inc., le CRSNG et le FQRNT dans le cadre du programme BMP.

Avant-propos

Le présent mémoire est composé de trois chapitres, dont l'un est rédigé sous forme d'article dont je suis l'auteure principale mais auquel a aussi grandement contribué ma directrice, Mme Sylvie Turgeon, Ph.D., ainsi que ma co-directrice, Mme Émilie Laurin, Ph.D. Les essais ont été réalisés au centre STELA de la faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation de l'Université Laval. J'ai compilé les résultats, fait les analyses statistiques et rédigés les chapitres, mais le projet a d'abord été élaboré en collaboration étroite avec ma directrice et ma co-directrice, qui ont toutes deux apporté leur contribution et leurs recommandations tout au long de ce projet.

Le premier chapitre constitue une revue de la littérature qui aborde le concept de satiété et s'attarde sur le rôle que peuvent jouer les fibres alimentaires dans le développement de la satiété. Le comportement rhéologique des solutions de fibres et leurs interactions sont aussi décrits, en relation avec les mécanismes impliqués dans le développement de la satiété. L'état des connaissances au sujet de l'impact des produits laitiers sur la satiété est présenté ainsi que les défis que représente l'incorporation de fibres, en concentration suffisante pour influencer la satiété, dans une matrice laitière fermentée. L'hypothèse de recherche et les objectifs du projet sont ensuite énoncés.

Le deuxième chapitre est un court rapport des travaux préliminaires correspondant au premier objectif de cette étude. Il s'agit de l'étude du comportement rhéologique de solutions de polysaccharides aux pH du lait, du yogourt, du milieu gastrique et du milieu intestinal.

Le troisième chapitre, intitulé « Inclusion de fibres dans une matrice laitière acidifiée ou fermentée : effet sur le comportement rhéologique en digestion in vitro » est sous forme d'article et rapporte les résultats des essais de laboratoire réalisés dans le cadre des objectifs 2 et 3 de ce projet. Des solutions de protéines laitières et de polysaccharides ont été acidifiées en utilisant de l'acide inorganique ou les ferments lactiques du yogourt et leur comportement rhéologique lors d'une digestion simulée a été étudié. La viscosité apparente à un taux de 30 s^{-1} a aussi été relevée afin d'identifier quelles formulations pourraient éventuellement avoir un effet physiologique.

Le présent mémoire est complété par une conclusion générale qui récapitule les différents résultats obtenus et fait le point sur les perspectives que soulèvent les connaissances acquises lors de ce projet.

Introduction

Le taux d'obésité dans le monde a connu une forte augmentation au cours des dernières années, de manière telle qu'on parle d'épidémie d'obésité. L'organisation mondiale de la santé (OMS) estime qu'en 2005, le monde comptait au moins 400 millions d'adultes (15 ans et plus) obèses (indice de masse corporelle (IMC) ≥ 30 kg/m²) et 1,6 milliard d'adultes faisant de l'embonpoint (IMC de 25 à 29,9 kg/m²). L'obésité toucherait également 20 millions d'enfants. L'OMS prévoit qu'en 2015, le nombre d'adultes obèses atteindra 700 millions (WHO 2006). La situation en Amérique du Nord est encore plus préoccupante. En 2004, selon l'Enquête sur la santé dans les collectivités canadiennes, 23,1% des adultes canadiens étaient obèses comparativement à 13,8% en 1978-1979. De plus, toujours en 2004, 36,1% des adultes faisaient de l'embonpoint (Tjepkema 2005). Les risques de développer certains problèmes de santé chroniques (diabète de type 2, maladies cardiovasculaires, hypertension et arthrose, entre autres) s'accroissent avec l'augmentation de l'indice de masse corporelle, ce qui contribue à gonfler les coûts reliés au surpoids. En 1997, les coûts directs liés au traitement des maladies associées à l'obésité (définie dans le cadre de cette étude par un $IMC \geq 27$) et à la recherche dans ce domaine s'élevaient à 1,8 milliard de dollars, soit 2,4% du total des dépenses des soins de santé au Canada (Birmingham, Muller et al. 1999). Neuf ans plus tard, les coûts directs reliés au surpoids atteignent près de 6 milliards de dollars, soit 4,1% des dépenses en santé au Canada en 2006, les coûts indirects étant estimés à 5 milliards de dollars (Anis, Zhang et al. 2009).

Le surpoids résulte d'un déséquilibre de la balance énergétique sur une période de plusieurs années. L'individu qui, sur une base régulière, consomme plus de calories qu'il n'en dépense se retrouve avec une balance énergétique positive, ce qui se traduit par une prise de poids. Une surconsommation quotidienne de seulement 10 kcal s'accompagne d'une augmentation de poids de 0,5 kg par année (Brown, Williams et al. 2005).

Ce contexte incite les transformateurs alimentaires à offrir des aliments favorisant la satiété afin de rejoindre les consommateurs cherchant un outil pour éviter la surconsommation. La satiété se définit comme la période de temps, suivant l'ingestion de nourriture, durant laquelle la faim et le désir de manger sont inhibés (Le Magnen 1992). La faim, qui exprime

la tendance à rechercher et à consommer de la nourriture, se distingue du désir de manger par ce qu'elle est une réponse physiologique liée, entre autres, à des mécanismes homéostatiques. Le désir de manger naît à la suite de divers stimuli, tant internes qu'externes (habitudes, fringales, publicité...)

Les fibres, principalement les fibres solubles, ont la capacité de provoquer un sentiment de satiété, par leur action sur la viscosité de l'aliment et celle du bol alimentaire tout au long de la digestion (Pereira et Ludwig 2001). Cependant, les études sur l'effet des fibres sur la satiété recensées dans la littérature font souvent appel à des suppléments consommés sous forme de capsules ou sous forme de poudre ajoutée aux aliments prêts à consommer.

Le yogourt, produit consommé pour ses nombreux attributs santé (relativement peu calorique, riche en nutriments, etc.), semble tout désigné pour concevoir un aliment permettant d'induire un effet de satiété plus important. L'ajout de fibres à un tel véhicule pourrait permettre l'atteinte de cet objectif.

Cependant, le yogourt est une matrice alimentaire complexe et fragile. La fermentation, au cours de laquelle se produit une lente acidification du lait, modifie les interactions électrostatiques des protéines laitières. Ces interactions maintiennent les micelles de caséines en suspension dans le lait sous une forme stabilisée par l'intermédiaire de charges négatives en surface qui empêchent les micelles de s'agglomérer. L'acidification neutralise ces charges, en plus de dissoudre le calcium micellaire: les caséines sont dénaturées et ne peuvent plus rester en suspension. Elles forment alors un réseau gélifié (Amiot, Fournier et al. 2002).

L'ajout de fibres dans un yogourt représente donc un défi important compte tenu de leurs interactions entre elles, avec l'eau et avec les protéines du lait. Un tel ajout peut affecter le procédé de transformation et avoir des impacts organoleptiques indésirables. De plus, la viscosité développée par les fibres dans le tractus gastro-intestinal est difficile à prévoir alors qu'elles subissent une dilution importante et des variations de pH, tout en interagissant avec les protéines et le calcium laitiers.

L'objectif de ce travail est d'étudier si l'ajout de polysaccharides à un yogourt affecte la viscosité développée lors de la digestion, dans le but de concevoir un produit susceptible de provoquer la satiété chez le consommateur.

Chapitre 1 : Revue de Littérature

1.1 Satiété

La satiété est modulée par plusieurs facteurs comportementaux, physiologiques et neurologiques. En 1987, Blundell a développé le concept de « cascade de satiété » pour décrire comment ces facteurs interagissent (Bellisle 2008). La figure 1 illustre cette cascade, telle que modifiée par D. Mela (Blundell, de Graaf et al. 2010). À la base se trouvent les aspects cognitifs et sensoriels. Les sensations éprouvées peuvent à la fois induire la satiété ou provoquer l'appétit. Ainsi, une certaine lassitude envers les sensations procurées par l'aliment qu'on vient d'ingérer contribue à la satiété. Au contraire, si les sensations sont variées, l'appétit est maintenu même si la faim est comblée (Le Magnen 1992). La variété maintient le plaisir éprouvé lors de la consommation des aliments, ce qui retarde la satiation et prolonge la durée du repas, augmentant par le fait même la quantité de nourriture consommée (Hetherington, Foster et al. 2006).

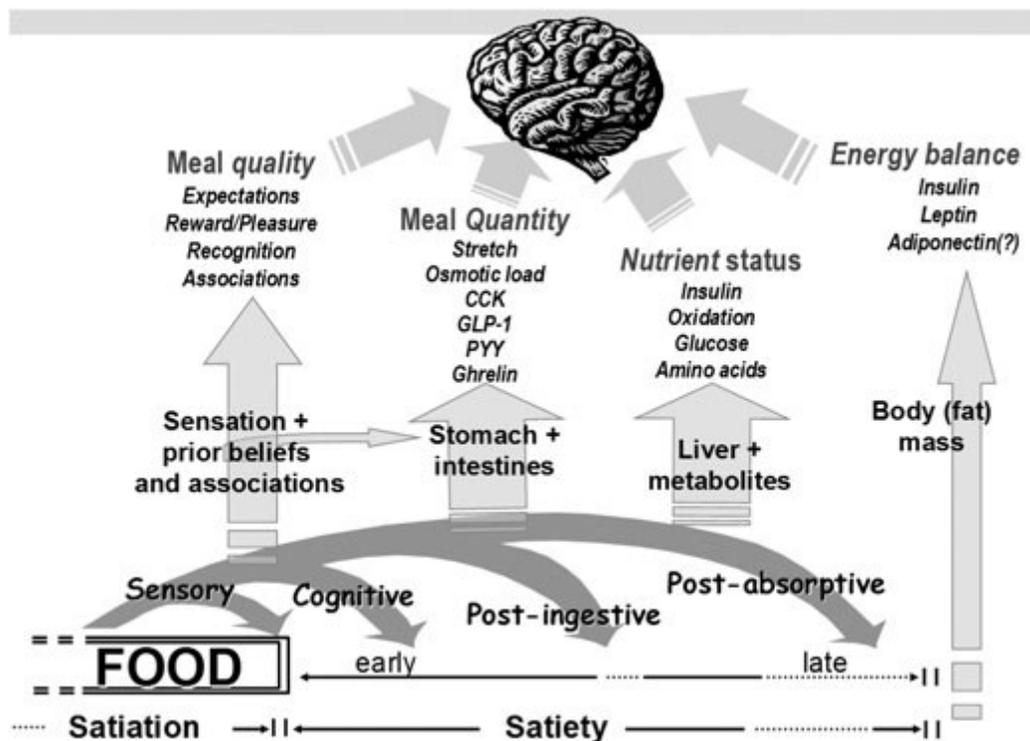


Figure 1 : Cascade de satiété de Blundell, modifiée par Mela. (Blundell, de Graaf et al. 2010)

Les savoirs ou les croyances à propos de la valeur nutritive des aliments ingérés jouent aussi un rôle sur la satiété. L'expérience personnelle permet de prédire la quantité de tel aliment qui suffira à soutenir la satiété jusqu'à la prochaine prise alimentaire. On parle alors de satiété attendue (Brunstrom, Shakeshaft et al. 2008). Aussi, les sources de distraction peuvent diminuer la conscience de la quantité de nourriture ingérée et interférer avec les signaux de satiété, retardant la satiation et menant à une plus grande consommation. C'est le cas lorsque la prise alimentaire s'effectue devant la télévision (Bellissimo, Pencharz et al. 2007) ou en présence d'amis (Hetherington, Anderson et al. 2006). L'effet de l'environnement est d'autant plus insidieux que le consommateur en est souvent inconscient (Vartanian, Herman et al. 2008).

Le comportement alimentaire du consommateur est acquis de l'environnement familial puis de ses propres expériences gustatives (Bellisle 2005). Trois concepts sont reconnus pour le qualifier. La désinhibition se définit comme la tendance à manger outre mesure en réponse à différents stimuli, qu'ils soient habituels, émotionnels ou situationnels. Le contrôle, qui peut être rigide ou flexible, réfère à la restriction consciente de la prise alimentaire afin de perdre du poids ou d'éviter d'en prendre. Enfin, la sensibilité à la faim désigne la susceptibilité de manger lorsque sont perçus les signes physiologiques soulignant le besoin de nourriture (Hays et Roberts 2008). Ces comportements alimentaires influencent à divers degrés la motivation à manger et la reconnaissance des signaux de satiété (Bellisle 2009).

Les aspects physiologiques intervenant dans la cascade de satiété entrent en jeu dès l'ingestion de nourriture. Le goût, les arômes et la texture des aliments envoient au cerveau des signaux qui peuvent soit stimuler, soit inhiber la prise alimentaire. Ensuite, la nourriture provoque la distension de l'estomac et la sensation de satiété qui en découle est fonction du volume ingéré (Goetze, Steingoetter et al. 2007). Le contact des nutriments avec les cellules de la paroi intestinale a aussi un impact important sur la libération de différentes hormones et contribue à ralentir la vidange gastrique en plus de stimuler directement ou indirectement les centres nerveux de satiété (Maljaars, Peters et al. 2008). Enfin, les nutriments absorbés continuent à envoyer des signaux.

La partie supérieure de la cascade de satiété illustre l'implication du cerveau dans le contrôle du comportement alimentaire, en réponse aux stimuli directs des hormones qui affluent dans la circulation sanguine depuis le système digestif et qui traversent la barrière sang-cerveau ou encore indirectement par l'entremise des divers signaux envoyés par les récepteurs du système digestif via le nerf vague (Naslund et Hellstrom 2007). De plus, la concentration du glucose sanguin pourrait également avoir un effet. Il s'agit de la théorie glucostatique, élaborée par Mayer en 1953, selon laquelle une concentration de glucose élevée provoquerait la satiété, tandis qu'une chute de cette concentration entraînerait le retour de la faim (Mayer 1953).

Diverses méthodes sont employées afin de mesurer la satiété. Des échelles visuelles d'évaluation sont utilisées pour déterminer subjectivement les sensations de faim, de satiété, de réplétion ou le désir de manger. Des méthodes objectives comportent la mesure du délai avant la prochaine ingestion de nourriture, la mesure de la quantité d'énergie consommée au(x) repas suivant le traitement et le suivi de biomarqueurs (Hull et Re 2010). Parmi ceux-ci, les plus utiles seraient les hormones liées à la satiété, dont la cholécystokinine (CCK), le glucagon-like peptide-1 (GLP-1), le peptide tyrosine-tyrosine (PYY) et la ghréline. Les trois premières hormones sont sécrétées par la muqueuse intestinale en réponse à la présence de nourriture et ralentissent la vidange gastrique, ce qui a pour effet de réduire la prise alimentaire. La ghréline, au contraire, est liée à l'initiation de la prise alimentaire, sa concentration dans le sang étant maximale juste avant la prise du repas et diminuant avec l'ingestion de la nourriture (Graaf, Blom et al. 2004). Elle contribue à augmenter la motilité gastrique et la vitesse de la vidange (Naslund et Hellstrom 2007).

1.2 Fibres et satiété

1.2.1 Définition des fibres

Traditionnellement, les fibres sont définies comme étant des composés de la paroi cellulaire des plantes qui ne sont ni digérés, ni absorbés dans le petit intestin chez l'humain et atteignent donc intacts le côlon (Cummings et Englyst 1991). En 2002, l'Institute of

Medicine of the National Academies des États-Unis a raffiné la définition en distinguant fibre alimentaire et fibre fonctionnelle. La première désigne les glucides indigestibles et la lignine qui font partie intégrante des végétaux et qui sont intacts. La fibre fonctionnelle désigne quant à elle les glucides indigestibles isolés des plantes et ayant un effet physiologique positif sur la santé des humains. Les fibres totales englobent les deux précédentes (Slavin 2008). Jusqu'à récemment, au Canada, peu de fibres extraites des végétaux étaient considérées comme des fibres alimentaires. Plusieurs ingrédients qui se comportent comme des fibres pouvaient être utilisés à des fins technologiques, comme additifs alimentaires, mais n'étaient pas reconnus comme sources de fibres (Agence canadienne d'inspection des aliments 2009). Cependant, Santé Canada a adopté une nouvelle définition des fibres en février 2012. Selon cette définition (Santé Canada 2012) :

Cette définition présente l'avantage d'inclure des fibres transformées et de sources autres

« Les fibres alimentaires sont :

- 1) les glucides ayant un DP (degré de polymérisation) de 3 ou plus naturellement présents dans les aliments d'origines végétale et n'étant ni digérés ni absorbés dans l'intestin grêle ; et
- 2) les fibres nouvelles acceptées.

Les fibres nouvelles sont des ingrédients fabriqués de façon à constituer des sources de fibres alimentaires : ce sont des glucides qui ont un DP de 3 ou plus et qui ne sont ni digérés ni absorbés dans l'intestin grêle. Elles sont issues de la production synthétique ou obtenues à partir de sources naturelles qui ne présentent pas d'antécédents d'utilisation sûre en tant que fibre alimentaire ou qui ont subi une transformation de nature à modifier les propriétés des fibres qu'elles contiennent. Les fibres nouvelles acceptées ont au moins un effet physiologique démontré par des données scientifiques probantes généralement reconnues.»

que végétales (animales, microbiennes, synthétiques).

Les fibres sont souvent distinguées en fonction de leur solubilité. Cependant, le National Academy of Sciences Panel on the Definition of Dietary Fiber préconise l'abandon de cette classification basée sur une propriété physique des fibres pour privilégier une classification basée sur des caractéristiques ayant été reconnues comme ayant un effet physiologique bénéfique, soit la viscosité et la fermentescibilité (Slavin 2005).

1.2.2 Mécanismes d'action des fibres

La prochaine section présente les différents mécanismes par lesquels les fibres peuvent influencer la sensation de satiété procurée par un aliment. Ceci inclut la densité énergétique et le volume, la fermentescibilité et la viscosité.

1.2.2.1 Densité énergétique et volume

La densité énergétique se définit comme la quantité d'énergie fournie par gramme d'aliment. Le contenu en eau affecte plus que les macronutriments la densité énergétique d'un aliment, puisqu'elle est responsable en grande partie du poids et du volume de ce dernier. Les aliments secs ont donc une densité énergétique plus élevée (Drewnowski, Almiron-Roig et al. 2004). Parmi les macronutriments, les lipides, avec leurs 9 kcal/g, sont ceux qui ont le plus d'influence sur la densité énergétique. Les aliments riches en fibres (fruits, légumes) ont généralement une faible densité énergétique. Dans les aliments transformés, les fibres sont parfois utilisées comme substituts de gras, ce qui contribue à diminuer la densité énergétique (Archer, Johnson et al. 2004). L'ajout de fibres, qui lient l'eau, contribue également à augmenter l'effet de volume et de poids (Burton-Freeman 2000).

Différentes études soulignent le rôle de la densité énergétique dans la satiété. Ainsi, sur une période de 1 an, une diète de faible densité énergétique (diminution des gras et consommation de végétaux valorisées) a favorisé une plus grande perte de poids et a diminué la faim plus efficacement qu'une diète où seule la diminution des gras était conseillée (Ello-Martin, Roe et al. 2007). À court terme, une boisson laitière dont la densité énergétique avait été diminuée par ajout d'eau s'est révélée plus rassasiant qu'une portion isocalorique du même aliment non dilué, ce qui indique que le volume peut avoir un effet sur la satiété plus important que le contenu énergétique. Ceci s'explique en partie par une distension gastrique plus importante, les mécanorécepteurs gastriques étant plus stimulés par un plus grand volume ingéré (Rolls, Castellanos et al. 1998). L'aspect cognitif entre aussi en jeu dans le développement de la satiété, puisque un aliment au volume supérieur est perçu comme étant plus rassasiant (Rolls, Bell et al. 1999). Dans la vie courante, la densité énergétique expliquerait environ 7% de la variance de la prise énergétique (Stubbs et Whybrow 2004).

1.2.2.2 Fermentescibilité

Plusieurs fibres sont fermentées par la flore microbienne du côlon. Parmi les sous-produits de cette fermentation, les acides gras à courte chaîne jouent un rôle potentiel sur la satiété. Ces acides gras provoquent la sécrétion du peptide PYY par les cellules-L de la paroi du côlon. L'augmentation de la concentration de cette hormone dans la circulation sanguine diminue la motilité de l'estomac, ayant pour effet de ralentir la vidange gastrique, d'où une augmentation de la satiété (Cherbut 2003). Si cet effet a été clairement identifié chez les animaux, les études cliniques chez l'humain présentent des résultats contradictoires, les fibres fermentescibles ayant démontré des effets positifs dans certains cas (Cani, Joly et al. 2006) alors que dans d'autres cas, elles ont été moins efficaces que les fibres non fermentescibles pour promouvoir la satiété (Howarth, Saltzman et al. 2003).

1.2.2.3 Viscosité

Les fibres visqueuses démontrent un plus grand pouvoir satiétogène que les fibres non visqueuses, la quantité seuil suffisant à provoquer la satiété étant moindre dans le premier cas (Slavin et Green 2007). La viscosité d'un produit a plusieurs impacts lors de son passage dans le tractus gastro-intestinal.

1.2.2.3.1 Augmentation du volume des sécrétions

Dans le cas d'un aliment solide, la présence de fibres augmente l'effort et le temps de mastication, ce qui entraîne une plus grande sécrétion de salive et de jus gastrique, d'où une distension gastrique plus importante et un effet positif sur la satiété (Slavin et Green 2007). Pour un aliment semi-solide ou liquide, les fibres visqueuses augmentent la durée de présence en bouche, augmentant les contacts avec la paroi buccale et amplifiant du coup les signaux sensoriels acheminés au cerveau. Puisque la différence dans l'effet de satiété entre un liquide visqueux et un autre non visqueux se fait sentir dans les 10 minutes suivant l'ingestion, les perceptions orosensorielles pourraient expliquer partiellement les mécanismes d'action de la viscosité (Mattes et Rothacker 2001). Une autre étude conclut que le taux d'ingestion du liquide a un impact sur la satiété, en plus de suggérer que les

croyances qui associent la viscosité d'un aliment à son contenu énergétique pourraient aussi influencer l'effet (Zijlstra, Mars et al. 2008).

1.2.2.3.2 Ralentissement de la vidange gastrique

L'ajout de fibres visqueuses à un aliment affecte grandement sa texture et modifie également la viscosité du digesta (Dikeman, Murphy et al. 2006). La supplémentation d'une diète avec 20g de pectine augmente la viscosité du bol alimentaire et ralentit la vidange gastrique comparativement à la même quantité d'alpha-cellulose (Schwartz, Levine et al. 1982). L'inclusion de 12g de gomme de guar dans une soupe entraîne une digestion plus lente des nutriments (French et Read 1994). La consommation de 10g de gomme de guar avant la prise des repas favorise une distension gastrique prolongée, d'où un signal de satiété plus durable (Krotkiewski 1984). De même, les fibres naturellement présentes dans un repas retardent le retour de la faim comparativement à la version faible en fibres du même repas (Benini, Castellani et al. 1995). La vidange gastrique étant ralentie, l'absorption des nutriments dans le petit intestin se fait plus graduellement.

1.2.2.3.3 Modulation de l'absorption des nutriments dans le petit intestin

Puisque l'arrivée des nutriments dans l'intestin est plus graduelle, le contact de ceux-ci avec les récepteurs de la muqueuse et les nutriments est prolongé (Sanaka, Yamamoto et al. 2007). L'absorption du glucose est ralentie par l'ajout d'un supplément de 5g d'alginate de sodium à un repas, amoindrissant les réponses glycémiques et insuliniques des sujets (Torsdottir, Alpsten et al. 1991), ce qui a pour effet, comme pour un aliment à faible indice glycémique, de retarder le retour de la faim (Ball, Keller et al. 2003). Des doses de 6 à 15g de pectine entraînent un épaissement de la couche d'eau statique (unstirred layer thickness) de la muqueuse du petit intestin, induisant une résistance à l'absorption des nutriments (Flourie, Vidon et al. 1984). La viscosité peut aussi induire une diminution du taux de diffusion des enzymes pancréatiques à leur substrat (Battilana, Ornstein et al. 2001).

1.2.3 Quelques fibres visqueuses étudiées pour leur effet satiétogène

Parmi les fibres visqueuses, quelques unes ont démontré un effet positif sur la satiété à des doses dont l'inclusion dans une portion régulière de yogourt est envisageable. Ainsi, l'ajout de 2g de gomme de guar dans 200g de breuvage laitier léger a augmenté le temps de transit moyen et cette augmentation a été corrélée significativement avec l'augmentation du sentiment de satiété (Wilmsurst et Crawley 1980). L'ajout de 5g de pectine dans un jus d'orange a aussi eu pour effet d'augmenter la satiété durant quatre heures après la consommation du jus et l'effet sur la satiété s'est poursuivi une heure après la consommation subséquente d'une collation (Tiwary, Ward et al. 1997). L'absorption de 1g de gomme de konjac en comprimés avant les repas a augmenté aussi la satiété chez des patients obèses (Walsh, Yaghoubian et al. 1984). L'ajout de 1% d'alginate à 325mL d'un substitut de repas s'est avéré efficace pour promouvoir la satiété (Hoad, Rayment et al. 2004). La consommation à long terme de 4g par jour d'une source de β -glucane a aussi eu pour résultat d'augmenter la concentration à jeun de PYY et GLP-1 tout en favorisant la satiété à la suite d'un repas-test (Greenway, O'Neil et al. 2007). Un breuvage non-nutritif comportant 1,5g de gomme de caroube a diminué le taux de vidange gastrique et prolongé la satiété comparativement au même breuvage contenant des doses inférieures (Marciani, Gowland et al. 2000). Enfin, 300 mL d'un jus enrichi d'un mélange de gomme xanthane (0,09%) et de β -glucane (0,23%) a davantage diminué la faim et donné un sentiment de réplétion plus élevé qu'un jus non enrichi ou enrichi de gomme xanthane seule (Paquin 2008).

1.3 Comportements rhéologiques des solutions de fibres

1.3.1 Viscosité et gélification

Les fibres mises en solution s'hydratent et augmentent la viscosité de la solution. Certaines, de par leur structure, ont aussi la capacité de former des gels, dépendamment des conditions du milieu. À faible concentration, les solutions de fibres viscosifiantes présentent un comportement newtonien, tandis qu'au-delà d'une concentration critique, le comportement devient pseudo-plastique. Différents facteurs affectent la viscosité d'une

solution contenant des fibres. La viscosité augmente avec la concentration en fibres et avec la masse moléculaire de celles-ci (Wood, Beer et al. 2000), alors que la viscosité est grandement réduite si les fibres sont hydrolysées avant de les hydrater (Wood, Braaten et al. 1994). Cependant, dans ce dernier cas, la réponse physiologique attendue ne se manifeste pas, ce qui indique que la viscosité est un facteur important pour expliquer l'effet physiologique (Wood, Braaten et al. 1994; Heini, Lara-Castro et al. 1998).

Le degré d'hydratation de la fibre importe également, comme le démontre la baisse de viscosité d'une solution où la gomme de guar et des maltodextrines de faible poids moléculaire se font compétition pour les molécules d'eau (Wolf, Wolever et al. 2003). Le pH des solutions joue également un rôle : en modifiant la charge des polysaccharides chargés, il peut influencer leur degré de solubilité (Draget, Smidsrod et al. 2005). Un faible pH peut également entraîner une hydrolyse acide de certaines fibres, dont la gomme de guar, d'où une baisse de viscosité (Wielinga 2009). D'autres fibres, telles que l'alginate, formeront un gel lors de la baisse de pH (Hoad, Rayment et al. 2004). Les polysaccharides chargés peuvent former des gels lorsqu'ils sont utilisés seuls (ex. : les κ - et ι -carraghénines (De Ruyter et Rudolph 1997)), en présence d'ions divalents (ex. : les alginates (Draget, Smidsrod et al. 2005)) ou lorsqu'ils sont exposés à un pH acide (ex. : certaines pectines (Agoub, Giannouli et al. 2009)).

1.3.2 Évolution de la viscosité en cours de digestion

Pour exercer son effet satiétogène, la matrice contenant des fibres doit exhiber une viscosité relativement importante tout au long de la digestion. Or celle-ci est exposée à des conditions extrêmes dans le système digestif (Cox, Spyropoulos et al. 2009). D'abord, la nourriture ingérée subit un important effet de dilution. Les sécrétions produites au cours d'une journée depuis la bouche, l'estomac, le pancréas, le petit intestin et la vésicule biliaire correspondent à environ trois à quatre fois le volume de nourriture ingérée (Beyer 2004). Cette dilution s'accompagne, règle générale, d'une perte de viscosité. Les aliments plus visqueux provoquent une plus grande sécrétion, de sorte que dans une expérience où étaient comparés différents dosages de gomme de caroube, une augmentation de la viscosité initiale du repas par un facteur de 1000 n'entraînait qu'un faible ralentissement de

la vidange gastrique (Marciani, Gowland et al. 2000). L'aliment est ensuite soumis à d'importantes variations de pH. D'un côté, l'estomac constitue un milieu acide, avec un pH variant de 1 à 4 (Beyer 2004). Les fibres non chargées sont généralement peu sensibles aux variations de pH. Par contre, les fibres portant des charges électrostatiques peuvent gélifier aux conditions acides prévalant dans l'estomac (Wolf, Lai et al. 2002). Dans le petit intestin, où s'effectue l'absorption des nutriments, le pH augmente pour s'approcher de la neutralité (Versantvoort, Oomen et al. 2005), ce qui affectera les interactions entre les molécules de fibres. L'aliment subit aussi du cisaillement dans le tractus digestif. Par exemple, les mouvements péristaltiques de l'estomac, qui permettent de convoier le bol alimentaire, exercent sur l'aliment des forces « de mouture » qui facilitent sa désintégration et qui ont été évaluées à environ 0,65N (Marciani, Gowland et al. 2001). Les enzymes présentes dans l'estomac et dans le petit intestin n'hydrolysent pas les fibres, qui arrivent intactes au côlon, où elles sont fermentées par la flore bactérienne, contribuant ainsi à environ 5 à 10% des besoins énergétiques de l'individu (Beyer 2004). Par contre les sels présents dans les sécrétions gastriques et duodénales peuvent modifier les charges électrostatiques des fibres et ainsi affecter leurs interactions. Les pectines peuvent aussi interagir avec les mucines, ces protéines sécrétées à la surface des muqueuses (Sriamornsak et Wattanakorn 2008).

1.3.3 Interactions entre polysaccharides

En solution, les polysaccharides peuvent interagir différemment. L'ajout de galactomannane (gomme de guar, gomme de caroube) diminue la concentration de k-carraghénane ou d'agarose nécessaire pour obtenir une gélification. Le galactomannane agirait comme point de jonction entre les chaînes du réseau gélifié (Turquois, Tavel et al. 1993). Les interactions de différents polysaccharides avec le β -glucane d'orge ont été étudiées en détail (Ghotra, Vasanthan et al. 2009). Plusieurs ont démontré un antagonisme, provoquant une diminution de la viscosité de la solution de β -glucane. Les mélanges contenant de la carboxyméthylcellulose et de la ι -carraghénane ont montré une action synergique dans toutes les conditions étudiées (concentration totale et ratio). La concentration totale en polysaccharides est un facteur important, puisqu'à la plus faible

concentration (0,5%), la gomme xanthane a une action antagoniste, tandis qu'à concentration plus élevée (0,75%), il révèle une action synergique, allant même jusqu'à former un gel mou, alors que l'interaction avec la λ -carraghénane est positive à faible concentration et négative à forte concentration. En plus d'augmenter la viscosité de la solution, les interactions synergiques amélioreraient la stabilité de la solution, empêchant la séparation de phases et améliorant la tolérance au cisaillement (Ghotra, Vasanthan et al. 2009). La gomme xanthane a aussi une action synergique avec les galactomannanes, son action étant plus marquée avec la gomme de caroube et menant à la formation de gel. Les liens hydrogène participent à l'interaction (Rinaudo et Moroni 2009). Par ailleurs, une séparation de phases survient au-delà d'une concentration seuil dans un système comprenant de la gomme xanthane et un autre polysaccharide anionique tel l'alginate de sodium, entraînant la formation par la gomme xanthane d'une phase mésomorphe semblable à un faisceau de fibres, dispersée dans la phase continue riche en alginate (Boyd 2005). Ce phénomène s'accompagne d'une diminution de la viscosité de la solution. Les conditions dans lesquelles les polysaccharides sont mis en contact modulent aussi l'impact de leurs interactions. Ainsi, le mélange à température ambiante d'une solution de glucomannane et d'une solution de gomme xanthane donne lieu à un gel plus faible que si ce même mélange est chauffé à 95°C puis refroidi. Au niveau moléculaire, les interactions demeurent pourtant les mêmes. Cependant, en procédant au mélange à la température ambiante, la formation d'un réseau gélifié continu est inhibée par le cisaillement, résultant plutôt en une dispersion de particules gélifiées (Fitzsimons, Tobin et al. 2008).

1.4 Fibres et produits laitiers

Depuis le début du 21^e siècle, la consommation de yogourt a beaucoup augmenté au Canada. Les Canadiens en ont consommé en moyenne 5,47 L en 2009, comparativement à 2,23 L en 1996 (Statistique Canada. Division de l'agriculture. 2010). Plusieurs facteurs expliquent cette croissance : aliment ayant un aspect santé et fonctionnel, polyvalence permettant de créer de nouveaux produits s'adressant à une niche particulière de consommateurs, variété des saveurs, etc. (Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation 2009). Le yogourt affiche donc un bon potentiel comme vecteur de satiété.

1.4.1 Produits laitiers et satiété

De par son contenu en protéines, le lait constitue en lui-même un aliment rassasiant (Dove, Hodgson et al. 2009). Entre autres, les protéines du lactosérum et les caséines augmentent la satiété par différents mécanismes et par la présence de peptides bioactifs, la libération de certains acides aminés après la digestion et l'interaction avec les autres composants du lait. Elles stimulent la production de biomarqueurs de satiété. À court terme, elles diminuent la prise alimentaire. L'homéostasie du calcium, c'est-à-dire la tendance de l'organisme à maintenir à une valeur normale la quantité de calcium dans le sang, pourrait en partie expliquer le rôle des produits laitiers dans le contrôle de la satiété, via un appétit « calcium spécifique ». Cette théorie se base sur l'hypothèse que les sujets carencés en calcium seraient portés à consommer plus d'aliments afin de combler leurs besoins. La consommation de produits laitiers, riches en calcium, viendrait contrebalancer ce comportement. Ce mécanisme, évident chez les animaux, reste à confirmer chez l'humain (Major, Chaput et al. 2008). Par ailleurs, chez des sujets consommant peu de calcium et suivant une diète réduite en calories, la consommation de lait enrichi en calcium atténue l'augmentation de l'appétit liée à la perte de poids, comparativement à la consommation d'une boisson à base de riz (Gilbert, Joannisse et al. 2011). Les auteurs attribuent cet effet à la suppression de l'appétit tant par le calcium que par la consommation plus importante de protéines lactières.

Cependant, une plus grande perception de satiété n'implique pas nécessairement une diminution de la prise alimentaire et, inversement, une diminution de la prise alimentaire n'est pas toujours corrélée à une augmentation du sentiment de satiété. À titre d'exemple, un jus de fruit enrichi de protéines lactières consommé en collation a causé une diminution significative de la prise alimentaire au repas suivant par rapport au contrôle (jus non enrichi) et au jus enrichi en maltodextrine, même si les évaluations de la faim et de la réplétion ne différaient pas (Bertenshaw, Lluch et al. 2008). À l'opposé, un lait au chocolat a diminué la faim et augmenté la satiété davantage que les boissons gazeuses, sans que cela se reflète sur la quantité de nourriture ingérée lors d'un dîner 30 minutes plus tard (Harper, James et al. 2007). Cela pourrait s'expliquer par le court laps de temps s'écoulant entre la prise de la collation et le repas. Ainsi, une autre étude démontre que la différence de satiété

perçue entre un lait et un jus de fruit augmente avec le temps. Dans cette étude, le lait a augmenté la satiété perçue et diminué la prise alimentaire de 8,5% à un repas servi 4 heures plus tard comparativement à un jus de fruit (Dove, Hodgson et al. 2009).

Le yogourt peut démontrer un effet satiétogène supérieur au lait. Cela serait relié à un temps de transit significativement plus long, causé par la plus grande viscosité du produit (Marteau, Flourie et al. 1990). Cette différence dans l'effet satiétogène n'est pas liée seulement à la viscosité du produit, puisque dans une autre expérience, un yogourt à boire et un yogourt semi-solide se sont révélés tous les deux plus rassasiants qu'une boisson laitière aux fruits. La présence de cultures vivantes et de leurs produits métaboliques pourrait avoir un effet sur la satiété (Tsuchiya, Almiron-Roig et al. 2006). Par contre, une équipe a obtenu des évaluations de satiété équivalentes pour un lait fermenté et un lait entier frais, bien que le premier ait provoqué un ralentissement de la vidange gastrique (Sanggaard, Holst et al. 2004).

1.4.1.1 Yogourts enrichis en fibres dans le but d'augmenter la satiété

L'impact sur la satiété de l'enrichissement en fibres de yogourt a été étudié à quelques reprises ces dernières années. En 2006, une demande de brevet a été déposée pour la conception et la méthode de fabrication d'un produit laitier frais (yogourt, yogourt à boire ou fromage frais) enrichi en fibres viscosifiantes et en protéines, potentiellement satiétogène (Aymard, Lluch et al. 2006). En 2009, une autre demande a été déposée, cette fois pour un produit laitier frais enrichi de trois types de fibres : des fibres solubles viscosifiantes auxquelles sont ajoutées des fibres solubles non viscosifiantes afin de diminuer la viscosité provoquée par les premières et des fibres non solubles qui apportent de la stabilité au produit (Aymard, Noble et al. 2009). Dans les deux cas, la satiété serait atteinte par le maintien d'une viscosité élevée tout au long de la digestion. Par ailleurs, la comparaison de collations isocaloriques constituées d'un yogourt à boire enrichi en fibres (inuline et pectine), d'un yogourt à boire régulier, d'une banane, de craquelins a montré que le yogourt enrichi en fibres avait tendance à être plus satiétogène que les autres collations, suivi par le yogourt régulier. L'effet de satiété identifié par les auteurs découlerait à la fois des protéines et des fibres qui augmentent la viscosité du produit et en diminuent la digestibilité (Almiron-Roig, Grathwohl et al. 2009). Dans une autre étude, un yogourt de

faible densité énergétique (180 kcal) enrichi en fibres (6g d'inuline pour 472 mL de yogourt) s'est montré aussi satiétant qu'un yogourt de haute densité énergétique (440 kcal), démontrant que l'ajout de fibres peut compenser la diminution de l'apport calorique (Perrigue, Monsivais et al. 2009). Le yogourt Shape Lasting Satisfaction, enrichi en protéines et en fibres (gomme de guar et oligofructose) et commercialisé en Grande-Bretagne par Danone, a été comparé lors d'une étude à d'autres produits commerciaux de densité énergétique similaire. Consommé en collation le matin, il entraîne une réduction de l'appétit et une diminution de la prise alimentaire lors du repas suivant. Les auteurs n'ont pas désigné spécifiquement les mécanismes d'action sur la satiété impliqués, mais ils soulignent que le produit est plus visqueux et maintient une plus grande viscosité en cours de digestion in vitro (données non publiées) et rappellent les effets de la viscosité sur la satiété rapportés antérieurement (Luch, Hanet-Geisen et al. 2010).

1.4.2 Défis liés à l'inclusion de fibres dans une matrice laitière fermentée

L'ajout de fibres visqueuses à un yogourt vient bousculer l'équilibre qui se forme entre les constituants du lait lors de la fermentation. La texture et la stabilité du yogourt risquent d'en être affectées. Cela soulève des défis tant au niveau de la formulation du produit qu'au niveau des pratiques industrielles.

1.4.2.1 *Structure du yogourt*

Le yogourt doit principalement sa matrice aux modifications des interactions entre les caséines du lait au cours de la fermentation. Le lait liquide devient semi-solide à mesure que les caséines s'agrègent et forment un réseau tridimensionnel (Tamime, Hassan et al. 2007). Bien que la structure de la micelle de caséine soit complexe et ne soit pas encore bien définie aujourd'hui, la plupart des modèles élaborés soulignent le rôle du phosphate de calcium et des interactions hydrophobes et électrostatiques (Smith et Campbell 2007). Dans le lait, les caséines, flexibles, s'assemblent en micelles sous l'effet des interactions hydrophobes et électrostatiques et sont stabilisées par des nanoagrégats de phosphate de calcium. La présence en surface des micelles de charges électronégatives explique la répulsion qui existe entre celles-ci et qui empêche leur agglomération (Smith et Campbell

2007). Cependant, l'acidification du lait au cours de la fermentation bouscule cet équilibre. Au pH naturel du lait (environ 6,7), les répulsions électrostatiques à l'intérieur de la micelle contrebalancent les interactions hydrophobes qui demeurent faibles même si elles sont nombreuses. En diminuant le pH à environ 5,6, les charges négatives en surface demeurent et empêchent toujours la coagulation des micelles. Mais le phosphate de calcium colloïdal est solubilisé, ce qui affaiblit la structure interne de la micelle, qui se maintient toutefois grâce à l'équilibre entre les interactions hydrophobes et électrostatiques. Une baisse plus poussée du pH neutralise les charges négatives, ce qui a pour effet à la fois de permettre l'agglomération des micelles et de renforcer les interactions hydrophobes internes (Horne 2009). Le suivi de l'acidification du lait en microscopie confocale à balayage laser a permis d'identifier trois étapes : de pH 6,6 à 5,5, la taille des micelles de caséines n'est pas modifiée; de pH 5,5 à 5,3, un début de coagulation est indiqué par des micelles plus grosses; de pH 5,3 à 5,0, le réseau tridimensionnel commence à se former, des agrégats de micelles étant séparés par du sérum. Au-delà de cette étape, le réseau continue de se former : les agrégats de protéines s'interconnectent et forment de plus larges cavités remplies de sérum (Tamime, Hassan et al. 2007).

1.4.2.2 Effets de l'ajout des fibres dans la matrice laitière

L'incorporation de fibres visqueuses dans une formulation de yogourt peut constituer un obstacle de taille, en fonction de la concentration utilisée. Des polysaccharides, sont déjà utilisés dans les yogourts commerciaux afin de modifier la texture, soit pour augmenter la viscosité, soit pour contrôler la synérèse ou encore pour modifier la sensation en bouche, particulièrement avec les produits réduits en gras. Parmi ceux-ci, certains sont des fibres visqueuses, bien qu'ils ne soient pas encore reconnus comme fibres par la réglementation canadienne. Les doses employées sont toutefois minimales (Tamime 2006). Une inclusion à une dose plus importante peut entraîner l'instabilité du produit, entre autres en bousculant les interactions impliquées dans la réorganisation des caséines au cours de la fermentation.

D'une part, une incompatibilité thermodynamique entre les protéines de la matrice et les polysaccharides, découlant de la présence de forces répulsives entre les polymères, provoquera une séparation de phases (Turgeon, Beaulieu et al. 2003), créant des zones enrichies en micelles de caséines. Cela favorise les interactions entre les protéines et a pour

effet d'accélérer la vitesse d'agrégation qui commencera aussi à un pH plus élevé (Horne 2009). La séparation peut être macroscopique, comme dans le cas d'une solution de 4% de protéines laitières et de 0,3% de gomme de caroube: deux phases apparaissent, l'une jaunâtre, enrichie en polysaccharides et, en-dessous, l'autre blanchâtre enrichie en protéines (Schorsch, Jones et al. 1999).

D'autre part, l'acidification de la matrice au cours de la fermentation peut conduire à la formation de complexes entre les protéines et les polysaccharides anioniques (Doublier, Garnier et al. 2000; de Kruif et Tuinier 2001; Girard, Turgeon et al. 2002; de Kruif, Weinbreck et al. 2004; Schmitt et Turgeon 2011). La charge globale des protéines devenant progressivement positive avec l'abaissement du pH, des interactions électrostatiques sont possibles avec les charges des polysaccharides. C'est ce qui se produit, par exemple, dans une solution mixte de protéines de lactosérum et de gomme xanthane. La formation de complexe s'accompagne d'une baisse de la viscosité de la solution (Laneuville, Paquin et al. 2000).

Un autre défi relié à l'inclusion de fibres est le développement d'une viscosité telle que le consommateur juge le produit inacceptable. Pour contourner ce problème, des agents supprimeurs de viscosité peuvent être intégrés, tels les maltodextrines (Wolf, Wolever et al. 2003), la gomme de guar hydrolysée ou la gomme arabique (Aymard, Noble et al. 2009). Cependant, les doses d'agents supprimeurs nécessaires sont considérables. Si dans le dernier cas, la dose ajoutée se limite à 1,5 à 4 fois la dose de fibres viscosifiantes, dans le premier cas la proportion atteint un facteur de 5 à 14. Cette méthode est donc d'usage limité, particulièrement au Canada où la plupart des fibres fonctionnelles sont considérées comme des additifs alimentaires agissant sur la texture et dont l'apport maximal autorisé dans un yogourt est de 2% (Publications du Québec 2009). Une autre solution consiste à élaborer une matrice dont la viscosité se développera au cours de la digestion (Foster et Norton 2009). Par exemple, l'utilisation d'une fibre qui gélifie au pH gastrique pourrait être privilégiée (Wolf, Lai et al. 2002; Norton, Frith et al. 2006).

1.5 Hypothèse et objectifs

Hypothèse : Dans un lait enrichi de deux fibres à action synergique, dont l'une porte des charges électronégatives, la formation de complexes avec les protéines lactiques durant la fermentation permet de contrôler la viscosité initiale du yogourt puis de favoriser l'interaction des deux fibres en cours de digestion et l'augmentation de la viscosité.

Objectifs :

- 1) Étudier les comportements rhéologiques à pH 6,6 (pH du lait), 4,3 (pH du yogourt), 2 (conditions gastriques) et 6 (conditions intestinales) de fibres seules et en mélange afin de sélectionner les mélanges dont la viscosité est élevée aux conditions gastriques et/ou intestinales;
- 2) Étudier le comportement rhéologique au cours d'une digestion in vitro de solutions de mélanges de fibres et de protéines lactiques acidifiées;
- 3) Étudier le comportement rhéologique au cours d'une digestion in vitro d'une matrice lactique fermentée enrichie en fibres;

Chapitre 2 : Comportement rhéologique de polysaccharides alimentaires à différents pH.

2.1 Introduction

La viscosité développée dans le système digestif par les aliments consommés est un des facteurs qui influencent le sentiment de satiété. Les fibres visqueuses présentent donc un intérêt en ce sens. Mais elles doivent être aptes à conserver leur viscosité dans la matrice alimentaire à laquelle elles sont intégrées, à travers le processus de transformation et aux conditions rencontrées en cours de digestion. Le but de cette expérience était de vérifier, dans un modèle très simplifié, quelle était la viscosité développée par des solutions aqueuses de polysaccharides (PS) soumises à un traitement thermique similaire à celui utilisé pour la fabrication du yogourt puis exposées par étape aux pH du lait, du yogourt, de l'estomac et des intestins, et ce afin de distinguer les PS présentant un comportement rhéologique pouvant potentiellement induire un sentiment de satiété. Des mélanges de PS reconnus pour interagir ont aussi été étudiés dans les mêmes conditions.

Objectif :

Étudier les comportements rhéologiques à pH 6,6 (pH du lait), 4,3 (pH du yogourt), 2 (conditions stomacales), et 6 (conditions intestinales) de polysaccharides (PS) seuls et en mélange.

2.2 Matériel et méthode :

Ingrédients

Les polysaccharides choisis sont des fibres visqueuses pour lesquelles des études ont révélé un effet satiétogène. Le tableau 1 fournit les noms complets des produits utilisés, ainsi que leur concentration en fibres.

L'alginat (A), la gomme de guar (G), la gomme de caroube (C), la pectine (P) et la gomme xanthane (X) ont été donnés par Nealanders (Mississauga, Canada) qui distribue ces produits de Tic Gums. Le β -glucan d'orge (B) a été donné par Cargill (Burlington, Canada).

Préparation des solutions :

Sous forte agitation, l'ingrédient a été dispersé dans l'eau dé-ionisée, pour obtenir une solution au pourcentage désiré de fibres (voir le tableau 2 pour les concentrations). Pour les solutions mixtes, les ingrédients étaient mélangés avant d'être hydratés. En tenant compte de la composition en fibres de chaque ingrédient, une concentration totale de fibre de 1% était visée. Cependant, la capacité à former des gels des mélanges de polysaccharides a obligé de travailler à concentration moindre dans certains cas.

La solution obtenue a été chauffée à 93°C et maintenue à cette température dans un bain d'éthylène glycol durant 6 minutes afin de reproduire les conditions de pasteurisation du lait généralement utilisées en production de yogourt. Elle a ensuite été refroidie et réfrigérée à 4°C pour la nuit.

Tableau 1 : Concentration en fibres des ingrédients utilisés.

Ingrédients	% fibres de la poudre
GuarNT Bland 200 HV Powder (G)	85
Tica-algin HG 600 F Powder (A)	70
Locust Bean Gum POR/A Powder (C)	80
Pectin LM 35 Powder (P)	60
Ticaxan Xanthan Powder (X)	85
B-glucan Barliv (B)	70

Tableau 2 : Concentration en fibres des solutions simples et mixtes utilisées

Ingrédients	% de fibres de la solution
G	1
A	1
C	1
P	1
X	1
B	1
G-X	0,3 (0,15/0,15)
C-X	0,2 (0,1/0,1)
B-X	1 (0,9/0,1)

Préparation des échantillons :

Le jour des analyses, la solution a été tempérée à la température pièce (environ 22 °C). Avec des solutions de HCl et de NaOH de différentes concentrations, le pH de la solution a été ajusté successivement à 6,6, 4,3, 2 et 6 sous forte agitation. À chaque étape, un échantillon était prélevé.

Mesure de la viscosité

La courbe d'écoulement de chaque échantillon a été faite avec un rhéomètre Ares 100frt (TA Instrument, New Castle, De) avec la géométrie plaque-plaque de 50 mm de diamètre. Les mesures ont été effectuées à température ambiante, à des vitesses de cisaillement allant de 0,02 à 1000 s⁻¹. Les analyses sur les deux répétitions des solutions de polysaccharides seuls ou en mélange ont été effectuées en duplicata.

2.3 Résultats et discussion

Solutions simples

La viscosité des galactomannanes (gomme de guar et gomme de caroube, Figures 2a et 2b) réagissent peu aux modifications de pH, quel que soit le taux de cisaillement et les courbes se superposent parfaitement. Pourtant, Wielinga (2009) a rapporté une baisse importante de la viscosité mesurée à 25 °C pour des solutions de gomme de guar préparées à des pH allant de 3,5 à 2, comparativement à une solution préparée à pH 4. Dans l'exemple rapporté, la gomme était dispersée dans des solutions acides sous agitation durant 10 minutes à 86-89 °C. L'auteur associe la baisse de viscosité à une dépolymérisation de la gomme. Dans notre expérience, la gomme était hydratée à son pH natif et l'acidification était faite à température ambiante limitant la possibilité d'avoir une dépolymérisation. L'état d'hydratation et les températures faibles expliquent peut-être la stabilité de la solution à pH 2. D'ailleurs, l'effet de la température sur la stabilité de la gomme de guar aux pH acides a été étudié par une équipe qui a démontré qu'à 25 °C, la gomme de guar hydratée ne subissait pas de dépolymérisation jusqu'à un pH de 2, mais que l'acidification s'accompagnait tout de même d'une légère baisse de la viscosité (Wang, Ellis et al. 2000), ce que nous n'avons par contre pas constaté (Tableau 3). Ils ont aussi constaté qu'à 37 °C, la gomme se dépolymérisait à des pH inférieurs à 3.

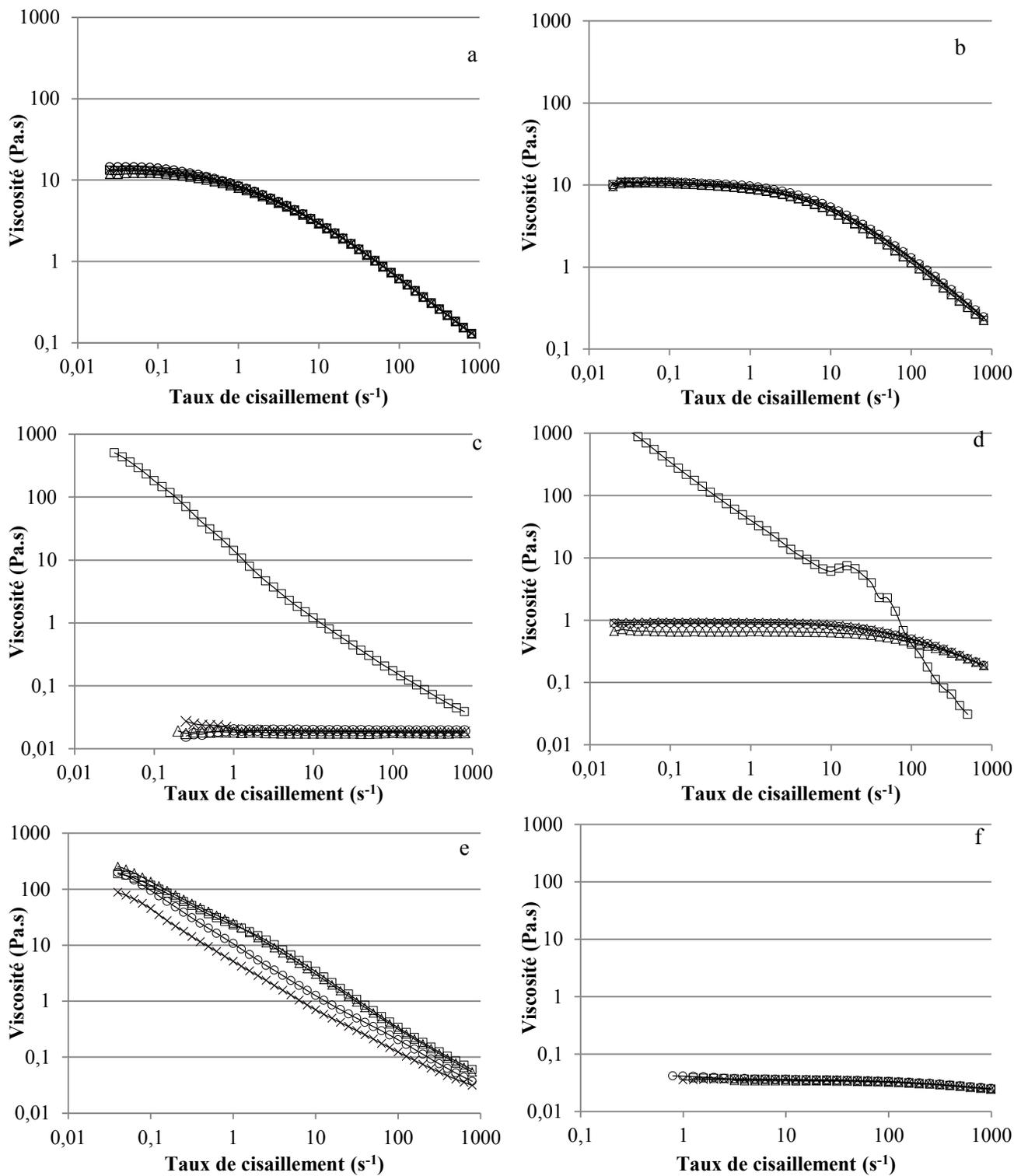


Figure 2 : Courbes d'écoulement des solutions de polysaccharides seuls à pH 6,6 (---x---), 4,3 (---o---), 2,0 (---□---) et 6,0 (---△---); a) gomme de guar 1%; b) gomme de caroube 1%; c) pectine LM 1%; d) alginate 1%; e) gomme xanthane 1%; f) β-glucane 1%.

Tableau 3 : Viscosité à un taux de cisaillement de 30 s⁻¹ des solutions de polysaccharides, seuls ou en mélange, à pH 6,6, 4,3, 2,0 et 6,0.

pH	6,6		4,3		2,0		6,0	
Solution	viscosité à 30 s ⁻¹ (Pa.s)	ET	viscosité à 30 s ⁻¹ (Pa.s)	ET	viscosité à 30 s ⁻¹ (Pa.s)	ET	Viscosité à 30 s ⁻¹ (Pa.s)	ET
G	1,4761	0,0389	1,4535	0,0594	1,4545	0,0690	1,4674	0,1034
C	2,6671	0,1441	2,7589	0,1656	2,7479	0,1674	2,6685	0,1958
P	0,0179	0,0004	0,0188	0,0007	0,5800	0,1933	0,0166	0,0016
A	0,6891	0,0255	0,6604	0,0264	6,7818	3,9937	0,5348	0,0056
X	0,3591	0,0140	0,4874	0,0051	1,0811	0,0048	1,0089	0,0098
B	0,0395	0,0056	0,0383	0,0046	0,0352	0,0011	0,0395	0,0047
GX	0,3041	0,0637	0,1183	0,0070	0,0660	0,00003	0,1086	0,0016
CX	1,1047	0,0388	0,8419	0,2206	0,0231	0,0003	0,1065	0,0188
BX	0,1688	0,0040	0,1570	0,0043	0,0679	0,0069	0,1361	0,0144

G : gomme de guar; C : gomme de caroube; P : pectine LM; A : alginate; X : gomme xanthane; B : β -glucane

La pectine et l'alginate (Figures 2c et 2d) ont adopté un comportement rhéologique similaire, un gel se formant à pH 2 puis la solution regagnant sa viscosité initiale lors du retour à pH 6,0. La formation de gel par la pectine LM, dirigée principalement par les interactions avec le calcium, est favorisée par l'augmentation des solides solubles et défavorisée par une augmentation du pH (Endreß et Christensen 2009). La poudre utilisée contenait une certaine quantité de calcium (111 mg/100 g), mais d'après le fournisseur, de 10 à 30 mg de calcium par g de pectine devait être ajouté à une solution contenant de 10 à 50% de solides solubles pour entraîner la formation d'un gel à pH 3,2 à 3,6, conditions qui n'ont pas été atteintes dans notre expérience. Cependant, la formation d'un gel par la pectine LM induit par un pH acide, même en absence de calcium, a été étudiée par d'autres équipes (Gilsenan, Richardson et al. 2000; Capel, Nicolai et al. 2006).

La formation d'un gel acide par l'alginate est un phénomène bien connu (Draget 2000) et cette propriété a été étudiée en condition stomacale par imagerie de résonance magnétique (Hoad, Rayment et al. 2004) et exploitée dans un concept d'aliment gélifiant dans l'estomac pour produire un effet de satiété (Williams, Lai et al. 2004).

La gomme xanthane est reconnue pour être relativement stable à différentes conditions de pH (Sworn 2009). Nous constatons cependant une augmentation de la viscosité lors de l'acidification de pH 6,6 à pH 2, alors qu'elle est demeurée stable lors du retour à pH 6,0 (Figure 2e). Dans ce cas, plutôt que le pH, c'est la force ionique de la solution qui entre en jeu. En effet, Sworn (2009) rapporte que les sels monovalents augmentent la viscosité des solutions de xanthane dont la concentration est supérieure à 0,25%. Cette augmentation est visible jusqu'à ce que la teneur en sels atteigne 0,1%, après quoi un plateau est atteint. Il apparaît donc que cette limite ait été atteinte lors de l'acidification à pH 2,0, d'où la viscosité équivalente lors du retour à pH 6,0.

Le β -glucan utilisé pour cette expérience développe peu de viscosité à une concentration de 1%, et ce, peu importe le pH de la solution (Figure 2f). Ce produit à viscosité réduite a été développé pour faciliter son incorporation dans les aliments. Une étude montre qu'une dose quotidienne de 6 g de ce produit, consommée sous forme de boisson (3 boissons contenant 2 g de Barliv par jour), améliore la sensibilité à l'insuline lors d'un test d'hyperglycémie provoquée par voie orale (Bays, Frestedt et al. 2011). Bien qu'aucune donnée sur la viscosité ne soit rapportée dans cette étude, les auteurs évoquent les mécanismes associés aux fibres visqueuses et la fermentation au niveau du côlon pour expliquer ces résultats.

Solutions mixtes

Les courbes d'écoulement des solutions mixtes (Figure 3) montrent que leur viscosité évolue fortement en fonction du pH des solutions. Les concentrations de gomme de guar, de caroube et xanthane ont été réduites dans les mélanges pour éviter la formation d'un gel. Même à concentration totale supérieure (0,3% contre 0,2%), la solution GX était moins visqueuse que la solution CX (Tableau 3 et Figures 3a et 3b). En effet, la force d'interaction entre les galactomannanes et la gomme xanthane est influencée par le ratio mannose : galactose des galactomannanes. Lorsqu'il y a moins de galactose en chaîne latérale, l'interaction est plus forte puisque la gomme xanthane interagit avec les zones non-substituées de la chaîne de mannose. Le ratio de mannose : galactose de la gomme de guar étant 2 :1, comparativement à 3,5 :1 pour la gomme de caroube, les interactions avec la gomme xanthane sont moins fortes (Sworn 2010). Étonnamment, le passage d'un pH près de la neutralité (6,6) à pH 4,3 s'est traduit par une baisse plus marquée de la viscosité pour

la solution GX alors que la solution CX est demeurée assez stable (Figures 3a et 3b). Les interactions entre la gomme de guar et la gomme xanthane étant moins forte, il est possible qu'elles soient plus affectées par la baisse de pH et l'apport de sels lors de l'acidification, le pH et la force ionique étant deux des facteurs dont dépendent les interactions (Sworn 2010). À l'inverse, la baisse de viscosité a été beaucoup plus marquée à pH 2,0 pour la solution CX. Sous l'effet de l'acidification, les groupes carboxylés de la gomme xanthane passent d'une forme ionisée à une forme protonée, entraînant un changement de conformation de la chaîne qui devient plus compacte, ce qui limite de façon importante les interactions entre les polysaccharides (Sworn 2010). La différence dans les viscosités exprimées par chacune des solutions à pH 2,0 n'est probablement due qu'à la concentration totale en polysaccharides.

Le retour à pH 6,0 (Tableau 3) s'accompagne d'un regain en viscosité pour ces deux solutions, qui n'atteint cependant pas la viscosité de départ. La concentration de sels ayant augmenté lors des changements de pH peut expliquer, en partie, cette différence. Il est aussi plausible que le procédé rapide d'acidification/neutralisation n'ait pas permis à la gomme xanthane de regagner sa conformation originale ou de se réhydrater complètement, d'où la perte de viscosité.

Une étude a déjà révélé l'action synergique entre le β -glucane et la gomme xanthane à un ratio 90 :10 (Ghotra, Vasanthan et al. 2009). La gomme xanthane semble gouverner le comportement rhéologique de cette solution mixte qui est pseudoplastique (figure 3c). Comme pour les solutions GX et CX, le passage à pH 2 s'accompagne d'une baisse marquée de la viscosité. Cependant, le regain de viscosité à pH 6,0 se rapproche davantage de la viscosité de la solution initiale.

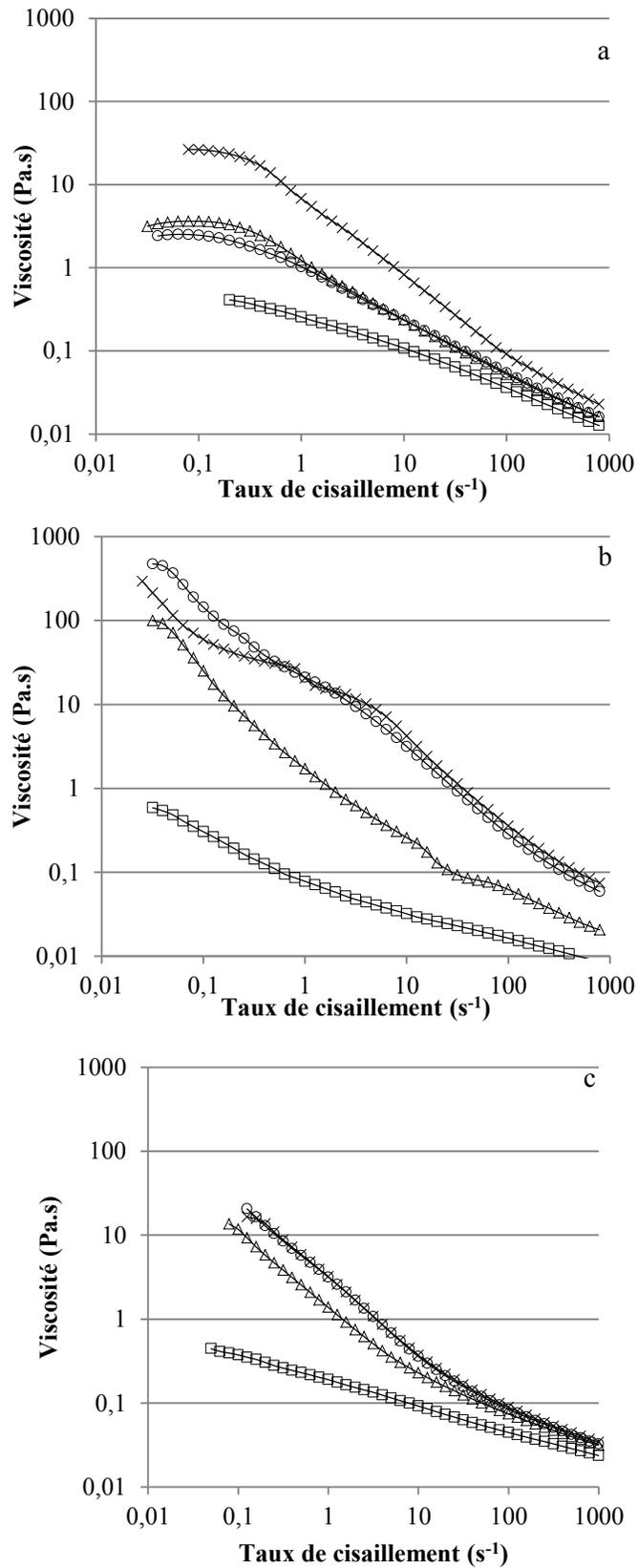


Figure 3 : Courbes d'écoulement des solutions de polysaccharides en mélange à pH 6,6 (·x·), 4,3 (·o·), 2,0 (·□·) et 6,0 (·△·); a) gomme de guar 0,15% + gomme xanthane 0,15%; b) gomme de caroube 0,1% + gomme xanthane 0,1 %; c) β -glucane 0,9% + gomme xanthane 0,1%.

Comportement à un taux de cisaillement de 30 s⁻¹

Un taux de cisaillement de 30 s⁻¹ a été choisi pour comparer la viscosité des solutions car il a préalablement été utilisé dans une étude qui a démontré une relation significative entre le logarithme de la viscosité d'une solution de glucose contenant du β -glucan et la réponse glycémique et insulinémique des participants (Wood, Braaten et al. 1994).

La viscosité au taux de cisaillement de 30 s⁻¹ des solutions simples de ces polysaccharides (Tableau 3) désigne l'alginate comme ayant un fort potentiel pour influencer positivement la satiété (viscosité de 6,78 Pa.s) au pH gastrique, alors que la gomme de caroube semble plus prometteuse au pH intestinal (2,67 Pa.s). Cependant, la capacité de l'alginate de former un gel en présence de calcium limite son utilisation dans les produits laitiers, ce qui explique qu'il n'a pas été retenu pour les essais suivants. La gomme de caroube semble donc être le deuxième meilleur choix à pH 2,0.

En comparant les viscosités à 30 s⁻¹ des trois solutions mixtes (Tableau 3), les solutions GX et BX à pH 2 et la solution BX à pH 6,0 peuvent sembler plus aptes, parce que plus visqueuses, à développer un modèle d'aliment aux propriétés satiétogènes. Cependant, en tenant compte de la concentration totale en polysaccharides, les solutions contenant des galactomannanes se révèlent plus intéressantes, tant du point de vue économique que pour une incorporation à une matrice alimentaire facilitée.

2.4 Conclusion

Dans cet essai, la capacité à former des gels des solutions mixtes de galactomannane et de gomme xanthane a limité les concentrations de polysaccharides utilisées, minimisant du coup leur viscosité aux différents pH permettant d'imiter la digestion d'une matrice laitière fermentée. Cet obstacle sera contourné en procédant d'abord à la formation de complexes entre la gomme xanthane et les protéines du lait, de façon à limiter les interactions entre les

polysaccharides. Les objectifs 2 et 3 de ce projet visent donc à étudier cette possibilité.

Chapitre 3 : Inclusion de fibres dans une matrice laitière acidifiée ou fermentée : effet sur le comportement rhéologique en digestion in vitro.

Judith Lavoie¹, Émilie Laurin², Sylvie Turgeon¹

¹ Centre de recherche en sciences et technologie du lait (STELA),
Institut sur la nutrition et les aliments fonctionnels (INAF), Université Laval,
Québec, Qc, Canada G1K 7P4

² Aliments Ultima inc., Granby, Qc, Canada, J2G 2X2

Résumé

Le comportement rhéologique d'une matrice laitière enrichie de gomme de caroube et de gomme xanthane a été suivi au cours d'une digestion in vitro. D'abord, des solutions à base de protéines laitières seules ou en mélange avec ces gommes ont été acidifiées sous agitation avant d'être soumises à la digestion. La formation de complexe entre le xanthane et les protéines lors de l'acidification a permis de réduire la viscosité initiale des solutions de protéines contenant les deux gommes. Sous l'effet de la digestion et des variations de pH, cette viscosité augmente de l'étape gastrique à l'étape intestinale, malgré la dilution. Ensuite, des solutions à base de poudre de lait écrémé (3,5 et 4% de protéines), enrichies ou non des mêmes gommes, ont été fermentées avant d'être soumises à la digestion. La composition en polysaccharides est le facteur influençant le plus le comportement rhéologique. La formation de complexe entre les protéines et la gomme xanthane semble limitée par l'apparition d'un réseau gélifié de protéines lors de la fermentation et une concentration plus élevée de minéraux limite également les interactions entre les deux gommes. La formulation et le procédé de transformation représentent donc des facteurs pouvant moduler grandement le comportement rhéologique des fibres.

3.1 Introduction

La consommation de fibres alimentaires dans la population nord-américaine est insuffisante. Statistique Canada évalue la consommation actuelle de fibres par les Canadiens entre 14 et 19g par jour, alors que l'Institute of Medicine des États-Unis recommande un apport quotidien de 25g pour les femmes et de 38g pour les hommes (Santé Canada 2010). Tant des études épidémiologiques que des études cliniques ont démontré l'impact positif des fibres sur la santé, d'où l'importance d'en consommer en quantité adéquate. Ainsi, une alimentation riche en fibres ou une supplémentation en fibres diminuent les risques de maladies cardiovasculaires (Liu, Stampfer et al. 1999; Wolk, Manson et al. 1999; Liu, Willett et al. 2000; Lairon, Arnault et al. 2005; Anderson, Baird et al. 2009; He, van Dam et al. 2010), abaissent la quantité de cholestérol sanguin (Marlett 1997; Bourdon, Yokoyama et al. 1999; Brown, Rosner et al. 1999; Queenan, Stewart et al. 2007; Babio, Balanza et al. 2010), atténuent la réponse glycémique après une prise alimentaire (Torsdottir, Alpsten et al. 1991; Brenelli, Campos et al. 1997; Vuksan, Jenkins et al. 1999; Wolf, Lai et al. 2002; Panahi, Ezatagha et al. 2007; Jenkins, Jenkins et al. 2008; Jenkins, Kacinik et al. 2010), réduisent les risques d'hypertension artérielle (Ascherio, Hennekens et al. 1996; Giacosa et Rondanelli 2010), contribuent à la santé intestinale (Vuksan, Jenkins et al. 2008; Grabitske et Slavin 2009; Stewart, Nikhanj et al. 2010) et augmentent la satiété (Blundell et Burley 1987; Astrup, Vrist et al. 1990; Burton-Freeman 2000; Yao et Roberts 2001; Slavin et Green 2007; Perrigue, Monsivais et al. 2009). L'effet hypocholestérolémiant des fibres visqueuses provient, du moins en partie, de leur aptitude à lier les acides biliaires, diminuant leur réabsorption intestinale et augmentant leur excrétion fécale. En contrepartie, la synthèse des acides biliaires est augmentée par le foie, à même les réserves sanguines de cholestérol-LDL (Marlett, Hosig et al. 1994; Slavin 2008; Wolever, Tosh et al. 2010).

Un autre mécanisme d'action des fibres sur la santé implique la viscosité qu'elles confèrent au contenu du tractus gastro-intestinal tout au long de la digestion, particulièrement de l'impact sur les lipides sanguins, la glycémie et la satiété. Par

exemple, des solutions contenant différentes fibres (gomme de guar, carboxyméthylcellulose, pectine), dont la viscosité initiale est équivalente, ne réussissent pas toutes à réduire l'hyperglycémie postprandiale. En fait, ces fibres n'adoptent pas le même comportement rhéologique lors de la digestion in vitro en réagissant différemment à l'augmentation de température, aux variations de pH et à la dilution (Brenelli, Campos et al. 1997). Le maintien de viscosités plus élevées lors de la digestion in vitro a été corrélé à un meilleur contrôle de la glycémie chez les sujets (Brenelli, Campos et al. 1997). Aussi, le sentiment de satiété que procure la gomme de guar ne se manifeste plus lorsque la gomme est préalablement hydrolysée, à cause de la diminution de sa viscosité (Heini, Lara-Castro et al. 1998). Un phénomène similaire a été observé avec deux sources de β -glucan de viscosités différentes obtenues par deux procédés de concentration distincts. Lors d'un test de tolérance au glucose, seul le β -glucan de viscosité plus élevée est parvenue à modifier la glycémie de façon significative par rapport au contrôle (Panahi, Ezatagha et al. 2007).

Plusieurs mécanismes entrent en jeu dans la modulation de la réponse glycémique par les fibres visqueuses. Une viscosité plus grande du bol alimentaire peut réduire l'accès de l' α -amylase à ses substrats (Leclere, Champ et al. 1994). L'interaction des fibres visqueuses avec les nutriments peut aussi expliquer la diminution de la réponse glycémique (Slavin 2008), tout comme l'épaississement de la couche d'eau couvrant la membrane apicale qui ralentit la diffusion du glucose (Flourie, Vidon et al. 1984). Le retard de la vidange gastrique, dû à l'augmentation de la viscosité du bol alimentaire, prolonge l'arrivée des glucides dans l'intestin, d'où une modulation de la réponse glycémique (Sandhu, El Samahi et al. 1987; Torsdottir, Alpsten et al. 1989; Torsdottir, Alpsten et al. 1991; Williams, Lai et al. 2004). Ces derniers mécanismes peuvent aussi intervenir dans l'effet de satiété procuré par les fibres. La distension gastrique causée par la grande capacité d'absorption d'eau des fibres visqueuses peut envoyer des signaux de satiété au cerveau par l'entremise du nerf vague (Graaf, Blom et al. 2004). Enfin, la viscosité intestinale fait en sorte de prolonger dans le temps et dans l'espace le contact entre les nutriments et la

muqueuse, favorisant le relargage de peptides satiétogènes (cholecystokinine, glucagon-like peptide 1, peptide YY) (Kristensen et Jensen 2011).

L'écart important entre la consommation actuelle de fibres et celle qui est recommandée offre aux industriels la possibilité de développer des produits enrichis en fibres et s'inscrivant dans la foulée des aliments procurant des bénéfices santé aux consommateurs. Le yogourt, qui est généralement perçu comme un aliment santé, représente un véhicule intéressant. Différents polysaccharides sont traditionnellement utilisés lors de la production industrielle du yogourt : gomme arabique, pectines, alginates, carraghénanes, gomme de caroube, etc. Ils servent d'agents épaississants ou stabilisants, contribuant à la texture, à la viscosité et à la liaison de l'eau pour diminuer la synérèse. Les quantités ajoutées dépendent de différents facteurs, dont les caractéristiques du polysaccharide (comportement rhéologique, solubilité), les interactions avec les autres constituants de la matrice, le pourcentage de solides totaux dans l'aliment et la législation (Tamime et Robinson 2007). Cependant, l'inclusion de fibres à une concentration où elles sont susceptibles d'agir physiologiquement par l'entremise de la viscosité maintenue en cours de digestion risque d'amener des défis importants quant à la stabilité et à l'acceptation du produit.

La gomme xanthane et la gomme de caroube sont deux fibres visqueuses susceptibles d'avoir un impact sur la santé des consommateurs. Par exemple, chez des sujets diabétiques, la gomme xanthane a la capacité de diminuer le niveau de glucose sanguin à jeun et postprandial (Osilesi, Trout et al. 1985). La gomme de caroube peut diminuer la vitesse de la vidange gastrique chez des sujets sains et conférer un effet de satiété à une solution non nutritive (Marciani, Gowland et al. 2000). Ces deux polysaccharides adoptent des comportements rhéologiques différents lorsqu'ils sont utilisés seuls ou en combinaison. En effet, leur utilisation conjointe entraîne la formation d'un gel, à une concentration aussi faible que 0,125% (Sandolo, Bulone et al. 2010), alors qu'ils ne gélifient pas lorsqu'ils sont utilisés seuls (Dea, Morrison et al. 1975). Plusieurs modèles ont été élaborés pour tenter d'expliquer leur action synergique. Un consensus existe toutefois quant à

une interaction associative entre les chaînes principales des deux molécules (Sandolo, Bulone et al. 2010).

L'ajout de gomme xanthane seule à une solution de poudre de lait écrémé ou de concentré de protéines laitières de pH neutre entraîne une coagulation des protéines, résultant en une séparation de phases visible après un entreposage de 24 heures pour des concentrations en gomme xanthane inférieures à 0,1%. À des concentrations supérieures, la forte viscosité de la solution empêche la séparation de phases (Hemar, Tamehana et al. 2001). Un phénomène similaire s'observe avec la gomme de caroube utilisée seule dans une solution de protéines laitières et de sucrose. Dans ce dernier cas, la séparation de phases est visible jusqu'à une concentration en gomme de 0,5% et serait due à une incompatibilité thermodynamique entre la gomme et les micelles de caséine (Schorsch, Jones et al. 1999). Ces mêmes gommes, utilisées seules (0,02% et 0,1%) ou en mélange (0,02%) affectent grandement la microstructure d'un lait gélifié par acidification, le réseau de caséine devenant plus compact et les pores plus grands. Le réseau formé en présence de gomme de xanthane est aussi plus organisé, probablement en raison d'interactions avec les caséines à mesure que le pH diminue (Sanchez, Zuniga-Lopez et al. 2000). De nombreux exemples d'interactions électrostatiques entre des polysaccharides chargés et des protéines ont été rapportés dans la littérature (Turgeon, Laneuville et al. 2009). Les complexes se forment suite à l'attraction entre des macromolécules en solution présentant des charges opposées. Il est également possible que les complexes se forment lorsque les deux polymères ont une charge nette de même signe. En effet, lorsque la protéine est faiblement chargée négativement (à un pH un peu au-dessus de son point isoélectrique), il peut exister des régions présentant une densité de charges positives, appelées « patches » qui peuvent se lier aux charges négatives du polysaccharide (Mattison, Dubin et al. 1998). En solution aqueuse, ces interactions électrostatiques permettent la formation de complexes entre les protéines du lactosérum et la gomme xanthane et s'accompagnent d'une baisse de la viscosité de la solution (Laneuville, Paquin et al. 2000).

Le but de cette étude était de vérifier le concept d'un produit laitier fermenté dont la viscosité en cours de digestion serait modulable afin d'avoir un impact positif sur la santé des consommateurs. Le contrôle de la viscosité reposerait sur l'interaction synergique entre la gomme xanthane et la gomme de caroube. La formation préalable de complexes entre les protéines laitières et la gomme de xanthane diminuerait les interactions entre les gommes dans le produit (pour éviter une viscosité trop grande), mais la dissociation du complexe lors de la digestion favoriserait une augmentation de viscosité. Pour tester la validité du concept, le comportement rhéologique du produit a été suivi au cours d'une digestion in vitro. Une première étude a été faite en utilisant un modèle simplifié à base d'une solution de concentré de protéines laitières acidifiée sous agitation. La seconde étude a été réalisée à partir d'une poudre de lait écrémé réhydratée et fermentée, afin de se rapprocher davantage de la production de yogourt.

3.2 Matériel et méthodes

3.2.1 Ingrédients

Le concentré de protéines laitières (CPL) a été donné par Aliments Ultima inc. (Granby, Canada) et la poudre de lait basse température (PLÉ) a été achetée chez Agropur (Longueuil, Canada). Leur composition respective est donnée au tableau 4. Les gommes xanthane (X) (TIC Pretested® Ticaxan®, Tic Gums, Philadelphie, États-Unis, 85% de fibres) et de caroube (C) (TIC Pretested® Locust Bean Gum POR/A, Tic Gums, 80% de fibres) ont été données par Nealanders Int'l. Un ferment commercial a été utilisé (Yo-mix 860) et provient de DuPont Danisco (Mississauga, Canada).

Tableau 4 : Composition du CPL et de la PLÉ

	CPL	PLÉ
Protéines totales (Nx6,38) (g/100g)	81,3	35,0
Humidité totale (g/100g)	5,7	3,7
Gras (g/100g)	1,6	0,6
Glucides (g/100g)	4,6	52,8
Cendres (g/100g)	6,8	7,9

3.2.2 Préparation des solutions

Solutions acidifiées

Les gommés alimentaires ont été hydratés séparément dans de l'eau dé-ionisée à une concentration en fibres de 1,4%. La dispersion s'est faite sous forte agitation et en chauffant, jusqu'à l'atteinte de 93 °C. Cette température a été maintenue durant 6 minutes, puis les solutions ont été refroidies à 20°C. Cette combinaison de temps-température (6 minutes, 93 °C) est représentative du traitement thermique que le lait subit lors de sa transformation en yogourt. La perte de volume par évaporation de l'eau, inférieure à 10%, n'a pas été compensée et est considérée équivalente pour toutes les conditions. Le CPL a été hydraté à une concentration de 7,8% dans de l'eau dé-ionisée, sous agitation modérée à température ambiante durant une heure, puis le même traitement de chaleur a été appliqué. Ces solutions-mères ont servi à préparer les solutions à acidifier, soit par ajout d'eau dé-ionisée en quantité égale (CPL (3,9%), X (0,7%), C (0,7%)), soit par mélange en ratio 1 :1 des solutions-mères (CPL+X et CPL+C). Cette concentration de protéine se rapproche de celle trouvée dans un yogourt et les concentrations en polysaccharides ont été choisies car elles permettaient d'obtenir une solution ternaire dont la viscosité était similaire à celle d'un yogourt commercial.

Solutions fermentées

Deux teneurs en protéines ont été choisies pour cette expérience. D'abord un niveau de 3,5% de protéines (P1) correspondant à la teneur protéique du lait est obtenu en solubilisant la PLÉ dans de l'eau dé-ionisée. Un niveau de 4% (P2) a été obtenu en ajoutant du CPL à la PLÉ. Cela correspond à un niveau d'enrichissement en protéines couramment utilisé en industrie laitière pour la fabrication des yogourts. Ces solutions de protéines laitières (PL) ont été agitées à température ambiante durant une heure, puis les gommés y ont été ajoutés séparément (concentration de 0,7%), sous forte agitation et en chauffant dans un bain d'éthylène glycol jusqu'à l'atteinte de 93°C, température qui a été maintenue durant 6 minutes. Les solutions ont par la suite été refroidies dans un bain-marie à 45°C, sans agitation. Pour préparer la condition mixte contenant la caroube et le

xanthane, les yogourts contenant chacun des polysaccharides ont été préparés et fermentés séparément et ont été mélangés après la fin de la fermentation. Cette procédure permet d'éviter l'interaction xanthane-caroube qui causerait une augmentation de viscosité pouvant interférer avec la gélification acide.

3.2.3 Acidification/Fermentation

Solutions acidifiées

Les solutions ont été acidifiées sous agitation à la température ambiante avec du HCl 1N, jusqu'à l'atteinte d'un pH de 4,6. Toutefois, la solution de protéines seules a été gardée à son pH initial dû à l'obtention d'un précipité hétérogène lors de l'acidification. L'agitation permet d'éviter la formation de gel lors de l'acidification. Une homogénéisation (Ultra-Turrax, IKA Works Inc., Wilmington, États-Unis) a été réalisée jusqu'à ce que les complexes fibreux formés par la solution CPL+X ne soit plus visibles. La solution obtenue était stable et ne présentait pas de séparation en cours d'entreposage. Pour éviter la formation de gel entre X et C, les solutions CPL+X et CPL+C ont été mélangées après acidification pour obtenir une solution de 3,9% de protéines et 0,35% de chacune des gommes. Les concentrations de polysaccharides ont été déterminées à partir de travaux préliminaires (données non montrées) ayant démontré que les solutions CPL+X+C ainsi formées donnaient des courbes d'écoulement similaires à celles de yogourts commerciaux.

Solutions fermentées

Les laits reconstitués, avec ou sans gomme, ont étéensemencés avec le ferment à 45°C, à un taux de 0,02%, puis placé en incubateur à 43°C, jusqu'à ce que le pH atteigne 4,6. Ils ont été ensuite refroidis à 20°C, après quoi ils ont été lissés à l'aide d'une seringue. Pour obtenir le système mixte contenant caroube et xanthane, les solutions PL+X et PL+C non lissées ont été mélangées à part égale après la fermentation, puis le mélange a été lissé.

3.2.4 Digestion *in vitro*

Le protocole de digestion a été adapté de celui proposé par Versantvoort *et al.* (Versantvoort, Oomen *et al.* 2005). Des solutions ont été élaborées pour imiter la salive, les sucs gastriques et duodénaux et la bile (compositions présentées à l'annexe 1). La figure 4 illustre le déroulement de la digestion effectuée à 37°C qui est réalisée le lendemain de l'acidification/fermentation des solutions. Pour permettre les mesures rhéologiques à chaque étape de la digestion, celle-ci est réalisée simultanément dans plusieurs tubes, un tube étant prélevé à chaque étape.

3.2.5 Comportement rhéologique des solutions acidifiées et fermentées

Le comportement rhéologique a été suivi en cours de digestion en effectuant des mesures de la viscosité en fonction du cisaillement à quatre moments : avant la digestion, 2 minutes après l'ajout de la salive, 30 minutes après l'ajout du suc gastrique et 1 heure après l'ajout du suc duodéal et de la bile. Ces temps d'exposition aux sucs gastriques et intestinaux diffèrent des temps recommandés par Versantvoort *et al.* En effet, des essais préliminaires réalisés avec des solutions mixtes de protéines laitières et de polysaccharides acidifiées ont permis de constater qu'une exposition plus longue que les temps retenus ne s'accompagnait pas d'une modification de la viscosité. Cependant, le degré d'hydrolyse des protéines n'a pas été mesuré. Étant donné que l'objectif poursuivi était d'étudier le comportement rhéologique et que celui-ci atteignait un plateau lorsque le temps d'exposition était prolongé, ces temps ont été retenus afin de limiter la durée totale de l'expérimentation. Les courbes ont été faites à des vitesses de cisaillement allant de 0,1 à 1000s⁻¹ avec un rhéomètre Ares-100ft (TA Instrument, New Castle, De) équipé d'un ensemble couette et cylindre. Les courbes ont été modélisées selon la loi de puissance (ou d'Ostwald-de Waele) qui lie la contrainte σ (Pa) au taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ (s⁻¹) :

$$\sigma = k\dot{\gamma}^n$$

où k (Pa.sⁿ) est une constante désignée comme un indice de consistance et correspond à la contrainte de cisaillement à la vitesse de cisaillement de 1 s⁻¹ et n ,

sans dimension, est l'indice du comportement d'écoulement qui évalue le comportement par rapport à un liquide newtonien. À $n=1$, la solution a un comportement newtonien; $n<1$ indique un comportement rhéofluidisant; $n>1$ indique un comportement rhéoépaississant (Rao 2007).

Dans ce modèle, la viscosité apparente est donnée par l'équation suivante (Keogh et O'Kennedy 1998) :

$$\eta = k\dot{\gamma}^{n-1}$$

Le modèle de puissance est celui qui se rapprochait le plus des données expérimentales, avec un coefficient de détermination (R^2) supérieur à 0,90 dans la majorité des cas. Cependant, l'adéquation entre le modèle et les données de certaines courbes (en présence de plateau ou d'une très faible viscosité) était moindre.

La valeur de viscosité au taux de cisaillement de 30 s^{-1} a été isolée aux fins de comparaison. Ce taux de cisaillement a préalablement été utilisé dans une étude qui a démontré une relation significative entre le logarithme de la viscosité d'une solution de glucose contenant du β -glucan et la réponse glycémique et insulinémique des participants (Wood, Braaten et al. 1994).

3.2.6 Analyses statistiques

Les données rhéologiques (indices k , n et viscosité à 30 s^{-1}) ont été analysées à l'aide du logiciel SAS 9.2 (SAS Institute Inc., Cary, USA) à chaque étape de la digestion, à partir des moyennes de deux répétitions du protocole. Dans l'expérience 1, six solutions ont été étudiées en plan aléatoire et les comparaisons ont été effectuées avec un test de la plus petite différence significative (LSD), en utilisant un niveau de signification de 5%. L'expérience 2 était une expérience factorielle à deux facteurs : la concentration en protéines (2 niveaux) et la composition en polysaccharides (4 niveaux). Les interactions ont été étudiées à partir des modèles linéaires généraux (procédures GLM).

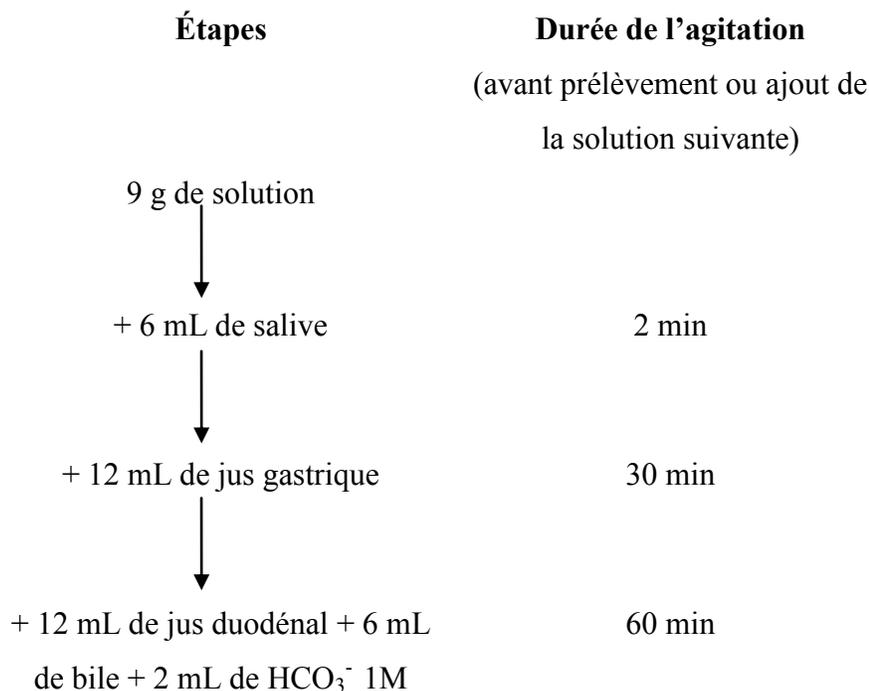


Figure 4 : Schéma présentant les étapes de la digestion in vitro.

3.3 Résultats et discussion

3.3.1 Étude du comportement rhéologique des solutions acidifiées au pH du yogourt et aux conditions simulant les étapes de digestion

3.3.1.1 Conditions initiales

Les courbes d'écoulement des solutions de protéines et des polysaccharides et des mélanges sont présentées à la figure 5A. Les solutions de protéines seules ont été étudiées à leur pH natif (6,8), tandis que les solutions de polysaccharides seuls et les solutions mixtes ont été étudiées au pH du yogourt ($4,6 \pm 0,1$). L'élément le plus intéressant de cette figure réside dans l'effet de la présence des protéines sur les polysaccharides en solution. À un faible taux de cisaillement, la viscosité de CPL+X est beaucoup plus faible que celle de la solution X (Tableau 5). Les paramètres k et n de la modélisation des courbes (1,0248 et 0,4265 comparativement à 6,9064 et 0,1312 pour la gomme xanthane seule, Tableau 5)

montrent que ces différences sont significatives. Ceci résulte de la formation des complexes entre la gomme xanthane, qui est un polysaccharide anionique (portant des groupes carboxyles), et les zones de charge positive qui se retrouvent sur les protéines laitières lors de l'acidification. Cet effet a été précédemment observé pour des solutions de gomme xanthane et de protéines de lactosérum lorsqu'elles passaient d'un pH neutre à un pH de 5,2 (Laneuville, Paquin et al. 2000). Les charges de la gomme xanthane étant partiellement « occupées » par les interactions avec les protéines, le polysaccharide lie moins de molécules d'eau et exhibe donc moins de viscosité. Les deux solutions adoptent toutefois un comportement pseudoplastique ($n < 1$, Tableau 5), et ce comportement est plus marqué dans le cas de la solution X (un n plus faible dans ce dernier cas indique une plus forte pente).

L'effet des protéines sur la viscosité de la gomme de caroube en solution est beaucoup moins important, bien qu'il soit encore significatif ($k = 1,0830$ et $2,7043$ et $n = 0,9440$ et $0,6745$ pour la solution C et la solution CPL+C respectivement, Tableau 5). Contrairement au cas précédent, la CPL+C a été plus visqueuse que la solution C. La gomme de caroube est un polysaccharide neutre (Wielinga 2009), il n'y a donc pas de complexe formé. En fait, il y a forte incompatibilité entre la gomme de caroube et les caséines laitières, ce qui se traduit en une séparation de phases dans les solutions moins concentrées, l'une riche en gomme de caroube, l'autre en protéines (Schorsch, Jones et al. 1999). Dans notre étude, la concentration de gomme utilisée donnait une solution suffisamment visqueuse pour éviter cette séparation de phases, ou du moins la ralentir considérablement de sorte que ce phénomène n'a pas été constaté. L'augmentation de viscosité de la solution CPL+C pourrait être due à l'agrégation des protéines entre elles en cours d'acidification, bien que l'agitation ait pu empêcher la formation d'un réseau continu de protéines.

Tableau 5 : Paramètres¹ de la modélisation des courbes de viscosité des solutions acidifiées à chaque étape de la digestion.

Solution	Concentration en polymères (%)			Étape du processus de digestion							
				Avant digestion		Buccale		Gastrique		Intestinale	
	CPL	X	C	k Pa.s ^{m-1}	n	k Pa.s ^{m-1}	n	k Pa.s ^{m-1}	n	k Pa.s ^{m-1}	n
CPL	3,9	0	0	0,0014 ^e	0,9410 ^a	0,0011 ^d	0,9798 ^a	0,0492 ^b	0,4358 ^d	0,0014 ^c	0,9129 ^a
X	0	0,7	0	6,9064 ^a	0,1312 ^e	2,4366 ^a	0,2736 ^e	0,2169 ^a	0,6116 ^c	0,1174 ^b	0,6080 ^b
C	0	0	0,7	1,0830 ^d	0,9440 ^a	0,1343 ^c	0,8779 ^{ab}	0,0276 ^{cd}	0,8898 ^{ab}	0,0058 ^c	0,9667 ^a
CPL+X	3,9	0,7	0	1,0248 ^d	0,4265 ^d	0,3607 ^{bc}	0,6169 ^c	0,0023 ^e	0,9646 ^a	0,1390 ^b	0,5388 ^b
CPL+C	3,9	0	0,7	2,7043 ^b	0,6745 ^b	0,2493 ^{bc}	0,7882 ^b	0,0378 ^{bc}	0,8513 ^b	0,0065 ^c	0,9435 ^a
CPL+X+C	3,9	0,35	0,35	1,8055 ^c	0,4929 ^c	0,5508 ^b	0,4721 ^d	0,0190 ^d	0,8112 ^b	0,2387 ^a	0,3701 ^c

¹Les valeurs présentées sont la moyenne de deux mesures.

Les données d'une même colonne avec la même lettre ne sont pas significativement différentes ($p < 0.05$).

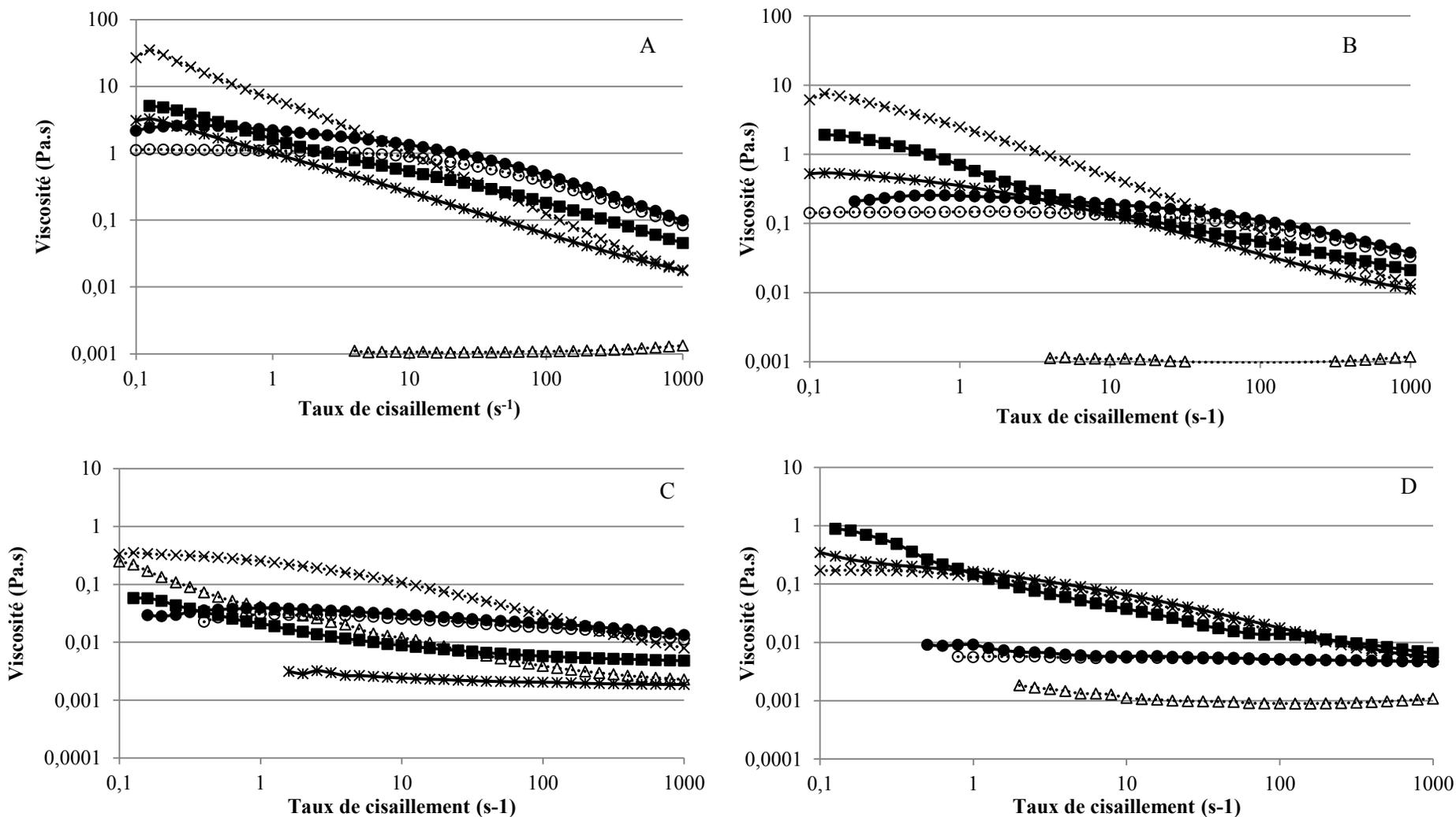


Figure 5 : Courbe de viscosité des solutions acidifiées : CPL 3,9% (\triangle), gomme xanthane 0,7% (\times), gomme de caroube 0,7% (\circ), CPL+X ($*$), CPL+C (\bullet), CPL+X+C (\blacksquare). A) conditions initiales (protéines : pH 6,8; polysaccharides et solutions mixtes : pH 4,6); B) étape buccale; C) étape gastrique; D) étape intestinale.

Les solutions de polysaccharides seuls ont un comportement pseudoplastique. Bien que la viscosité initiale de la solution de gomme de caroube soit plus faible que celle de la solution de gomme xanthane, elle résiste mieux à l'augmentation du cisaillement, d'où la présence d'un long plateau (Figure 5A). La gomme xanthane adopte un comportement pseudoplastique plus marqué, la viscosité diminuant rapidement, ce qui se traduit par un paramètre n plus faible (Tableau 5). Cette caractéristique est due à la capacité des molécules de xanthane de former des agrégats intermoléculaires basés sur des liaisons hydrogène et à l'enchevêtrement des molécules dans la solution au repos (Sworn 2009). Ces agrégats se défont progressivement sous l'effet du cisaillement, d'où la baisse progressive de viscosité de la solution (Sworn 2009).

Le comportement pseudoplastique de la solution CPL+X+C est similaire à celui de la solution CPL+X, avec une pente très proche, quoique significativement différente ($n=0,4929$ et $0,4265$ pour CPL+X+C et CPL+X respectivement), mais avec des viscosités plus élevées. Le caractère pseudoplastique de la gomme xanthane domine donc le comportement rhéologique, alors que l'action synergique des gommes xanthane et de caroube explique l'augmentation de viscosité. Le mécanisme d'interaction entre les deux gommes implique la formation de liens non-covalents entre la chaîne principale du xanthane et les zones dépourvues de galactose de la chaîne de la gomme de caroube, de façon à former un réseau tridimensionnel (Morris, Rees et al. 1977). Les jonctions hétérogènes ainsi formées seraient thermodynamiquement plus stables au cisaillement que la structure hélicoïdale ou désordonnée du xanthane seul (Morris et Foster 1994).

3.3.1.2 Comportement en conditions buccales

L'ajout de la solution buccale occasionne une légère remontée du pH (aux alentours de 4,9). Cette solution ne comportant que de l'amylase, qui est sans effet sur les protéines et les polysaccharides utilisés, les changements de viscosité à cette étape découlent principalement d'un effet de dilution des systèmes (Figure 5B). La solution X est celle qui a la consistance la plus élevée ($k=2,4366$, Tableau 5). Une autre distinction notable par rapport à la première étape réside dans le fait que les courbes CPL+C et C ne sont plus significativement différentes ($k=0,2493$ et $0,1343$ et $n=0,7882$ et $0,8779$ respectivement, Tableau 5).

3.3.1.3 *Étape gastrique*

À cette étape, la viscosité a fortement diminué pour toutes les solutions. L'importante diminution du pH ($\text{pH} \approx 2,3$) occasionne des modifications dans le comportement rhéologique des solutions. La solution de CPL s'éloigne du comportement newtonien pour adopter un comportement pseudoplastique, avec une importante augmentation de la viscosité malgré les dilutions (Figure 5C). Le pH acide favorise l'agrégation des protéines. Les agrégats étaient visibles dans ces solutions et certains agrégats demeuraient visibles même après les 30 minutes de digestion durant lesquelles ils étaient exposés à la pepsine. L'hydrolyse à cette étape était probablement incomplète après 30 minutes à cause d'une accessibilité plus difficile de la pepsine pour les protéines agrégées. Une digestion gastrique plus lente des caséines coagulées dans l'estomac a été rapportée par Dangin et Boirie (Dangin, Boirie et al. 2002).

L'acidification à un pH inférieur au pKa des groupes carboxyliques contribue aussi à diminuer la charge de la gomme xanthane. Les groupes carboxyles devenant progressivement protonés, cela se traduit par une diminution des répulsions entre les molécules de xanthane (Agoub, Smith et al. 2007). Selon Sworn (2009), cela occasionne une structure moléculaire plus compacte et une réduction de la viscosité à des pH inférieurs à 4,0, diminution surtout marquée à un faible taux de cisaillement ($0,01 \text{ s}^{-1}$). Cependant, des travaux préliminaires (dont les résultats sont présentés au chapitre 2) n'ont pas permis de constater ce fait. Il est probable que les variations dans les paramètres k et n de la courbe de la solution X proviennent principalement de la dilution.

La solution CPL+X adopte un comportement pratiquement newtonien ($n=0,9646$) et la viscosité chute de façon draconienne par rapport à l'étape buccale, devenant plus faible que celles des solutions individuelles de X et CPL. Ce phénomène est étonnant puisque la solution X conserve une certaine viscosité et que la solution de protéine seule forme des agrégats qui augmentent la viscosité. Théoriquement, la diminution des charges de la gomme xanthane devrait entraîner sa libération des complexes et permettant une plus grande viscosité dans cette solution mixte. Les analyses rhéologiques effectuées ne permettent pas d'expliquer pourquoi la solution mixte adopte un comportement si distinct de celui des solutions des polymères seuls, mais quelques hypothèses peuvent être émises.

La gomme xanthane est moins hydratée lorsqu'elle est sous forme complexée, et bien que les complexes soient vraisemblablement brisés à cette étape à cause du pH acide, l'effet de ce pH sur la conformation de la gomme xanthane ne favorise pas son hydratation, d'où une viscosité moindre. Aussi, des agrégats s'étant formés lors de l'ajout de la solution gastrique, il est possible qu'ils aient sédimentés lors de la mesure, pouvant contribuer à une plus faible viscosité. Enfin, les caséines laitières soumises au pH gastrique forment des agrégats qui retardent la protéolyse (concept de « slow protein » (Dangin, Boirie et al. 2002). Il est plausible que la présence de xanthane ait limité ou ralenti l'agrégation des caséines facilitant l'action des enzymes gastriques. Ceci aurait pour conséquence de limiter l'augmentation de la viscosité lors de la digestion gastrique. Il a déjà été démontré que la digestion in vitro des caséines était ralentie en présence de divers polysaccharides (Acton, Breyer et al. 1982; Lamghari-El-Kossori, Sanchez et al. 2000). Cependant, même si des polysaccharides chargés ont été utilisés au cours de ces études, les solutions étudiées étaient à pH neutre, donc il n'y avait pas de formation de complexes. Par ailleurs, une équipe (Mouécoucou, Villaume et al. 2004) a fait la démonstration que la digestion pepsique de la β -lactoglobuline était augmentée en présence d'une forte concentration de polysaccharides formant des complexes solubles avec la protéine. L'effet de la formation de complexe sur la digestion de la caséine reste donc à étudier.

À cette étape, les comportements rhéologiques des solutions C et CPL+C ne sont pas significativement différents (Tableau 5) et sont dominés par la gomme de caroube. Il est possible que la présence de caroube ait retardé ou limité l'agrégation des protéines en augmentant la viscosité de la solution. La courbe de CPL+X+C se rapproche de celle du CPL. Son comportement pseudoplastique est moins marqué ($n= 0,8112$ et $0,4358$ respectivement), alors qu'aux étapes initiales et buccales, la viscosité était plus près de celle de la solution X. La présence de sels (Higiro, Herald et al. 2007), provenant à la fois du procédé d'acidification et des solutions utilisées pour mimer la digestion, et la diminution du pH (Edwards, Blackburn et al. 1987) entraînent une diminution des interactions entre les deux types de gomme, en particulier à cause de l'effet de ces facteurs sur la conformation du xanthane. Cela a pour conséquence de diminuer la viscosité de la solution CPL+X+C de façon plus marquée que celle de la solution X.

3.3.1.4 *Étape intestinale*

À l'étape intestinale, l'ajout des solutions de digestion contribue à une dilution très importante par rapport à l'étape gastrique. Le retour à un pH de 6 et l'hydrolyse poussée des protéines par les enzymes intestinales lors de cette étape occasionne la baisse de viscosité de la solution de CPL (Figure 5D). Ceci est expliqué par la digestion des caséines et de la β -lactoglobuline en peptides qui de par leur faible poids moléculaire ont une viscosité plus basse. D'autres auteurs ont constaté des résultats semblables avec des yogourts digérés dans des conditions similaires à notre étude (Rioux et Turgeon 2012).

Les courbes des solutions C et CPL+C se superposent et adoptent un comportement pratiquement newtonien. À faible concentration, plusieurs polysaccharides, dont les galactomannanes, ont un comportement newtonien. L'augmentation de la concentration de gomme de guar fait apparaître un comportement pseudoplastique à des taux de cisaillement de plus en plus faible, le plateau newtonien diminuant progressivement (Lapasin et Priel 1995). Dans le cas présent, chaque dilution s'est traduite par un plateau newtonien plus long, jusqu'à la disparition du comportement pseudoplastique. Aussi, à cette étape, les protéines sont digérées et le comportement est dirigé seulement par la gomme de caroube. Lors d'une expérience précédente au cours de laquelle diverses solutions de polysaccharides étaient acidifiées au pH imitant les conditions de la digestion, la stabilité aux conditions acides de la gomme de caroube a été constatée (résultats présentés au chapitre 2). La baisse de viscosité dans le cas présent serait donc due uniquement à l'effet de dilution.

Les solutions contenant de la gomme xanthane se distinguent clairement des autres solutions. La viscosité de la solution X a été relativement peu affectée par la dilution. Le passage à un pH près de 6,2 « ré-ionise » les groupes carboxyles de la gomme xanthane, ce qui lui permet de revenir à sa conformation originale, d'où un regain en viscosité (Sworn 2009) qui pourrait avoir partiellement compensé l'effet de dilution. Le comportement rhéologique des solutions CPL+X et CPL+X+C est encore plus intéressant puisqu'une augmentation de la viscosité a été constatée par rapport à l'étape précédente. Une heure d'exposition aux protéases intestinales entraîne l'hydrolyse poussée des protéines de ces solutions. Cette digestion engendre un mélange de peptides de différentes tailles,

principalement composé de peptides de cinq à six acides aminés (Kopf-Bolanz, Schwander et al. 2012) qui pourrait éventuellement interagir avec la gomme xanthane, mais le pH de 6,1 n'est plus favorable à la formation de complexes. À cette valeur de pH supérieure à son pK, la gomme xanthane « libérée » des complexes est donc mieux hydratée et adopte sa conformation originale, d'où le retour de sa viscosité. D'ailleurs, les solutions CPL+X et X ont un comportement rhéologique similaire, avec des paramètres de modélisation qui ne sont pas significativement différents ($k= 0,1390$ et $0,1174$; $n=0,5388$ et $0,6080$ respectivement, Tableau 5). Quant à la solution CPL+X+C, le regain de viscosité s'explique à la fois par le retour à la conformation originale du xanthane et aux interactions entre les deux gommes qui sont à nouveau favorisées par le pH plus élevé.

3.3.2 Viscosité des solutions acidifiées à un taux de cisaillement de 30 s^{-1} aux conditions simulant la digestion.

Comme il a été mentionné en introduction, la viscosité développée par les fibres dans le système digestif contribue à leurs effets physiologiques bénéfiques, une relation ayant même été démontrée entre la viscosité mesurée à 30 s^{-1} d'une solution de glucose enrichie de β -glucane d'avoine et la réponse glycémique des participants soumis au test de tolérance au glucose (Wood, Braaten et al. 1994). Cette valeur de cisaillement a aussi été utilisée pour comparer le comportement des systèmes de la présente expérience aux différentes étapes de la digestion. La viscosité initiale des solutions de β -glucane ayant eu un impact sur la glycémie était de $1,91 \text{ Pa.s}$, soit une viscosité supérieure à celle de toutes les solutions étudiées dans la présente étude (Tableau 6). Cependant, il serait hâtif de conclure que ces solutions n'auront pas d'effets significatifs sur la viscosité du milieu digestif puisque le comportement rhéologique lors de la digestion des solutions de β -glucane n'a pas été rapporté par Wood *et al* (Wood, Braaten et al. 1994). Des viscosités élevées aux étapes gastriques et intestinales nous intéressent particulièrement car un test de tolérance au glucose effectué chez des chiens (Meyer, Gu et al. 1988) rapporte que la réponse glycémique est améliorée lorsque la viscosité est élevée à la fois au niveau gastrique et au niveau intestinal.

Dans le modèle étudié, la solution X a été la plus visqueuse en conditions gastriques ($\eta= 0,0590 \text{ Pa.s}$, tableau 6), suivie par les solutions CPL+C et C ($\eta= 0,0227$ et $0,0193 \text{ Pa.s}$

respectivement). La solution CPL+X+C n'était pas significativement différente de celle des protéines seules ($\eta=0,0096$ et $0,0059$ Pa.s, respectivement), cette dernière n'étant pas significativement différente de CPL+X ($\eta=0,0020$ Pa.s). À l'étape gastrique, en ne considérant que la viscosité à 30 s^{-1} , la gomme de caroube seule semble donc la plus susceptible d'offrir un effet physiologique bénéfique lorsqu'incorporée à une matrice laitière.

Tableau 6 : Viscosité (valeurs expérimentales) des solutions acidifiées à un taux de cisaillement de 30 s^{-1} aux étapes simulant les conditions de digestion.

Solution	Concentration en polymères (%)			Viscosité ¹ (Pa.s)			
	CPL	X	C	Initiale	Buccale	Gastrique	Intestinale
CPL	3,9	0	0	0,0011 ^e	0,0010 ^d	0,0059 ^{cd}	0,0010 ^b
X	0	0,7	0	0,3353 ^c	0,1813 ^a	0,0590 ^a	0,0314 ^a
C	0	0	0,7	0,6370 ^b	0,1074 ^{bc}	0,0193 ^b	0,0052 ^b
CPL+X	3,9	0,7	0	0,1310 ^d	0,0805 ^c	0,0020 ^d	0,0300 ^a
CPL+C	3,9	0	0,7	0,8514 ^a	0,1388 ^b	0,0227 ^b	0,0053 ^b
CPL+X+C	3,9	0,35	0,35	0,3502 ^c	0,0909 ^c	0,0096 ^c	0,0238 ^a

¹ Moyenne de deux mesures. Les données d'une même colonne avec la même lettre ne sont pas significativement différentes ($p<0.05$).

Par contre, à l'étape intestinale, les solutions de protéines laitières contenant de la gomme xanthane s'avèrent plus visqueuses que celles contenant seulement de la gomme de caroube, les solutions CPL+X et CPL+X+C étant même plus visqueuses qu'à l'étape gastrique ($\eta= 0,0300$ et $0,0238$, tableau 6). La gomme xanthane, seule ou additionnée de gomme de caroube, apparaît donc comme la gomme la plus susceptible d'avoir un effet au niveau intestinal sur la solution de protéines laitières.

En résumé, l'acidification d'une solution CPL+X permet d'en diminuer la viscosité par le jeu de la formation de complexes, tandis qu'un regain relatif de viscosité (en tenant compte de la dilution) s'effectue en retournant à un pH près de la neutralité en conditions intestinales. La complexation de la gomme xanthane permet aussi d'ajouter de la gomme de

caroube sans que la viscosité de la solution obtenue soit excessive. La gomme de caroube contribue à augmenter la viscosité à toutes les phases de la digestion lorsque comparée à la solution CPL+X. Enfin, le modèle étudié ne permet pas d'identifier une condition unique qui procurerait une viscosité maximale à la fois en conditions gastriques et intestinales. Afin de vérifier si ces effets seraient aussi observés dans un yogourt, les mêmes polysaccharides ont été étudiés dans un système acidifié par fermentation.

3.3.3 Étude du comportement rhéologique des solutions fermentées aux conditions simulant les étapes de digestion

Pour cette étude, deux niveaux de protéines (3,5 et 4%) ont été étudiés. Ces solutions ont été enrichies ou non des mêmes polysaccharides (xanthane ou caroube) utilisés lors de l'étude précédente, aux mêmes concentrations, avant d'être acidifiées lentement par fermentation lactique. Afin de faciliter la lecture des figures, étant donné que les courbes sont très similaires pour les deux concentrations de protéines, seules les courbes des solutions fermentées contenant 3,5% de protéines sont présentées, cependant les paramètres de modélisation des courbes d'écoulement aux deux concentrations sont présentés au tableau 7 et l'annexe 2 présente un tableau des valeurs de probabilité pour les effets de concentration de protéine et de formulation en gommes.

3.3.3.1 Conditions initiales

Les solutions fermentées (valeurs initiales à 30 s^{-1} de 0,1123 à 2,4849 Pa.s, tableau 8) ont présenté des viscosités supérieures à celles des solutions acidifiées (de 0,0011 à 0,8514 Pa.s, tableau 6). La fermentation lente des solutions a permis la formation d'un réseau gélifié de protéines. Les caractéristiques rhéologiques de ce réseau sont affectées entre autres par le type et la vitesse d'acidification (Lucey, Tamehana et al. 1998). Le gel ainsi formé contribue à augmenter la viscosité, comme en témoigne le comportement rhéologique des solutions PL. De plus, les courbes des solutions protéiques seules présentent une particularité : à des vitesses de cisaillement intermédiaires, des irrégularités apparaissent dans la courbe (figure 6A). Ce phénomène a été observé pour des yogourts fermes sans polysaccharides (Rioux et Turgeon 2012) et serait probablement dû à la durée du test de viscosité effectué qui ne permet peut-être pas d'atteindre une valeur à l'équilibre

avant de faire la mesure à la vitesse suivante. Dans les yogourts avec polysaccharides, ce phénomène est inexistant, confirmant que ces derniers dominent le comportement rhéologique, apportant beaucoup de consistance et de viscosité comparativement aux solutions de PL seules. D'ailleurs, les valeurs F du tableau de l'annexe 2 démontrent clairement que c'est le facteur formulation, soit l'ajout de fibres, qui explique massivement les variations du modèle statistique.

Contrairement à l'étude précédente sur les solutions acidifiées, la solution PL+X a exhibé de fortes viscosités. Il est probable que la fermentation lente, sans agitation, ait favorisé la formation du réseau de protéines gélifié au détriment de la formation de complexes fibreux (du moins, ceux-ci n'étaient pas visibles). De plus, la composition des poudres de protéines utilisées pour les deux études étaient aussi très différentes (Tableau 4). Pour obtenir une quantité équivalente en protéines, les quantités de minéraux et de lactose accompagnant les protéines varient grandement entre les deux sources de protéines utilisées. Le CPL contient peu de minéraux et de lactose et il n'était pas nécessaire d'en ajouter autant pour atteindre le niveau de protéine souhaité. Avec seulement 35% de protéines, il était nécessaire d'ajouter davantage de PLÉ, ce qui s'accompagnait d'une plus grande présence de lactose et de minéraux dans la solution. La quantité de solides totaux dans le yogourt avec PL peut être associée à une diminution de l'indice du comportement d'écoulement (n) et une augmentation de la viscosité et de l'indice de la consistance (k) (Penna, Converti et al. 2006). De plus, la teneur élevée en minéraux a probablement nui à la formation de complexe, permettant à la gomme xanthane de manifester son comportement viscosifiant.

Les laits fermentés avec caroube ont aussi présenté une viscosité élevée, mais avec un caractère pseudoplastique moins marqué que les laits fermentés avec xanthane, correspondant au caractère visqueux des polysaccharides seuls (Fig 6A et Fig 5A). Les solutions PL+X+C ont montré une consistance plus élevée que toutes les autres solutions, mais leur comportement pseudoplastique a été moins prononcé ($n=0,2155$, tableau 7) que celui des solutions PLÉ+X, d'où un comportement légèrement moins rhéofluidisant.

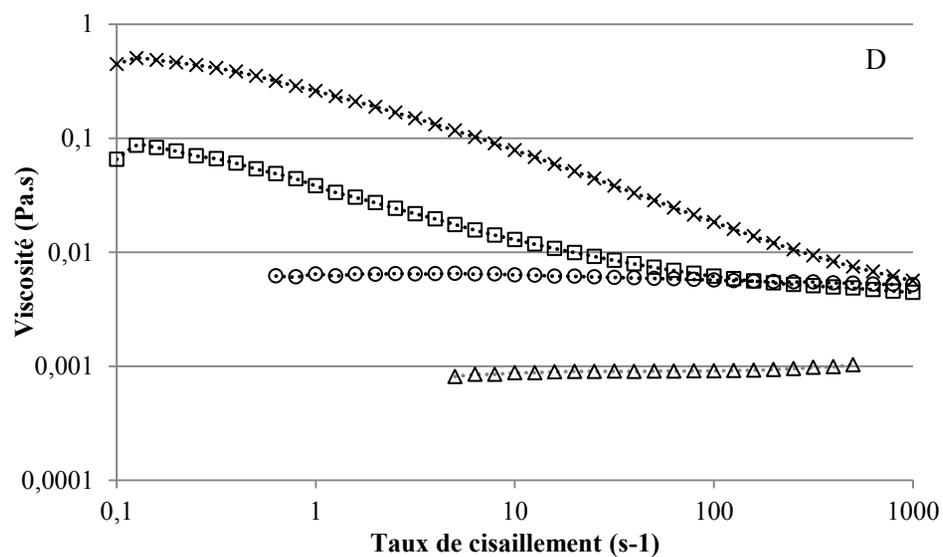
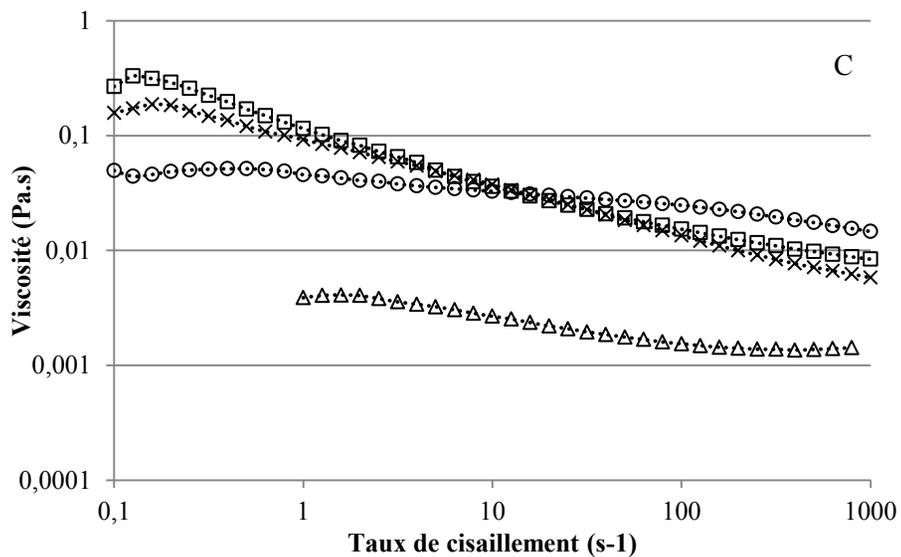
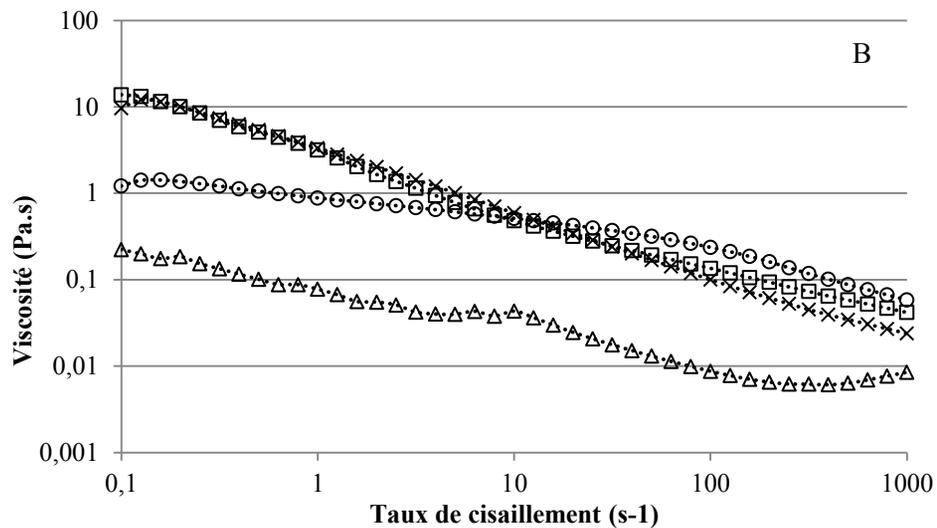
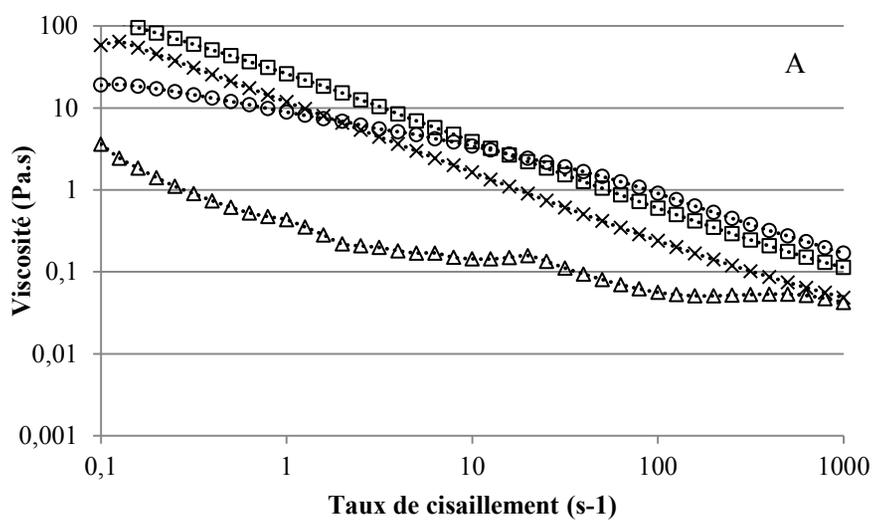


Figure 6 : Courbes de viscosité des solutions fermentées; PL (\triangle), PL+X (\times), PL+C (\circ), PL+X+C (\square). A) avant digestion; B) étape buccale; C) étape gastrique; D) étape intestinale.

Tableau 7 : Paramètres¹ de la modélisation des courbes de viscosité des solutions fermentées à chaque étape de la digestion

Solution	Concentration en polymères (%)			Étape du processus de digestion							
				Avant digestion		Buccale		Gastrique		Intestinale	
	PL	X	C	k (Pa.s ^{m-1})	n	k (Pa.s ^{m-1})	n	k (Pa.s ^{m-1})	n	k (Pa.s ^{m-1})	n
PL	3,5	0	0	0,5373 ^d	0,4367 ^a	0,0754 ^f	0,5635 ^b	0,0142 ^d	0,6400 ^b	0,00119 ^d	0,9936 ^a
PL	4,0	0	0	0,8172 ^d		0,1109 ^f	0,5063 ^c				
PL+X	3,5	0,7	0	11,1461 ^c	0,1621 ^d	3,4854 ^b	0,2462 ^f	0,0964 ^b	0,5734 ^b	0,2506 ^a	0,4702 ^d
PL+X	4,0	0,7	0	12,9174 ^c		4,1135 ^a	0,2287 ^f				
PL+C	3,5	0	0,7	13,2141 ^c	0,4062 ^b	0,7883 ^e	0,7427 ^a	0,0523 ^c	0,8424 ^a	0,0084 ^c	0,9292 ^b
PL+C	4,0	0	0,7	18,5436 ^b		0,9164 ^e	0,7213 ^a				
PL+X+C	3,5	0,35	0,35	23,8956 ^a	0,2155 ^c	2,4495 ^c	0,3193 ^e	0,1233 ^a	0,5466 ^b	0,0337 ^b	0,6472 ^c
PL+X+C	4,0	0,35	0,35	22,1781 ^a		1,8399 ^d	0,3716 ^d				

¹Les valeurs présentées sont la moyenne de deux mesures.

Les données d'une même colonne avec la même lettre ne sont pas significativement différentes (p<0.05).

L'analyse statistique des paramètres de modélisation (Tableau 7) indique une interaction significative des facteurs concentration de protéines et formulation (nature des polysaccharides ajoutés) pour la consistance. Cet effet provient d'une consistance plus élevée en présence de caroube pour la teneur en protéine plus élevée ($k= 13,2141$ pour PL3,5% +C et $18,5436$ pour PL4%+C), alors que pour les autres conditions la consistance a été similaire aux deux niveaux de protéines. La caroube est un polysaccharide neutre dont l'incompatibilité avec les protéines laitières a déjà été démontrée (Schorsch, Jones et al. 1999); la présence d'une teneur en solides totaux plus élevée peut avoir favorisé un tel comportement contribuant à augmenter la consistance. Cependant, l'augmentation de la concentration en protéines n'a pas modifié la pente de la courbe, comme le démontre l'absence de différence significative pour l'indice n .

3.3.3.2 Étape buccale

L'effet de l'ajout de la salive est principalement associé à la dilution, le pH variant peu (légère augmentation à 4,7-4,8) et la solution ne contenant pas de substrat pour l'amylase. La dilution des solutions fermentées a donc modifié légèrement leur comportement rhéologique. Dans tous les cas, les pentes ont été moins prononcées (augmentation du paramètre n , Tableau 7). Avec un paramètre m beaucoup plus élevé qu'à l'étape initiale ($n \approx 0,7$ comparativement à $0,4$, Tableau 7), les solutions PL+C se rapprochent du comportement de la gomme de caroube en solution (Tableau 5). Même si les courbes PL+X et PL+X+C semblent être similaires, leurs paramètres étaient significativement différents. La consistance des mélanges PL+X était plus élevée que celle des mélanges PL+X+C, mais avec un n plus faible, caractéristique du caractère pseudoplastique plus prononcé pour le xanthane. De plus, contrairement à l'étape précédente, la consistance plus élevée pour les solutions PL+X ($k=3,4854$ et $4,1135$ pour PL+X à 3,5 et 4% de protéines respectivement) indique que celles-ci ont été moins affectées par la dilution que les solutions contenant de la gomme de caroube. Cet effet différent de la dilution pourrait s'expliquer par la nature différente des interactions dans les deux systèmes. Selon le polysaccharide présent, des conditions associatives ou ségréгатives peuvent prédominer. Le système laitier résultant peut être plus ou moins sensible à la dilution et donc à la déstabilisation. Nous pouvons émettre l'hypothèse que dans le cas du système avec xanthane, les interactions associatives fortes contribuent à maintenir une viscosité plus élevée même après la dilution de l'étape

buccale. Dans le cas de la caroube, des conditions ségréatives dues à la neutralité de ce polysaccharide créent des conditions où la structure du produit fermenté est plus instable. Ainsi, des équipes ont étudié l'impact de l'ajout de β -glucanes, un autre polysaccharide neutre, dans les produits laitiers. L'une d'elles a déterminé qu'avec des concentrations allant jusqu'à 0,5%, les β -glucanes formaient des agrégats avec les micelles de caséine lors de la fermentation et aucune séparation de phases n'était visible (Singh, Kim et al. 2012). Une autre équipe a étudié différentes concentrations de β -glucanes dans des solutions laitières de pH neutre de diverses fractions volumiques de caséines. Pour toutes les fractions volumiques de caséine étudiées, l'utilisation de β -glucanes en concentration supérieure à 0,5% causait une séparation de phases (sédimentation ou gélification) due à un mécanisme de déplétion floculation des caséines liée à la nature non-adsorbante du β -glucanes (Repin, Scanlon et al. 2012). Cependant, l'incompatibilité entre la gomme de caroube et les protéines laitières semble encore plus forte que celle exprimée par les β -glucanes, car même des solutions de 0,1% de caroube ont montré une séparation de phases (Schorsch, Jones et al. 1999).

L'analyse statistique dévoile une interaction des facteurs concentration de protéines et formulation qui se manifeste de diverses façons dans les paramètres de modélisation des courbes. En effet, la consistance a été significativement plus élevée pour la solution PL4%+X comparativement à PL3,5%+X, c'est-à-dire quand la concentration en protéines est plus élevée. C'est toutefois le contraire qui se produit avec les solutions PL+X+C. La plus forte concentration de protéine a donné une consistance moindre ($k=1,8399$ comparativement à 2,4495, Tableau 7), semblant démontrer que les protéines peuvent interagir avec la gomme xanthane et gêner les interactions xanthane-caroube. Le comportement pseudoplastique des solutions de PL seules est plus prononcé lorsqu'il y a plus de protéines ($n= 0,5635$ et $0,5063$ pour PL3,5% et PL4% respectivement), alors qu'il est plus prononcé lorsqu'il y a moins de protéines pour les solutions PL+X+C ($n=0,3193$ et $0,3716$ pour PL3,5%+X+C et PL4%+X+C, tableau 7). Ici encore, la présence de plus de protéines, en interagissant avec la gomme xanthane, pourrait diminuer la force des interactions entre celle-ci et la gomme de caroube, rendant la solution plus sensible à l'augmentation de la vitesse de cisaillement.

3.3.3.3 *Étape gastrique*

Les courbes des solutions PL+X et PL+X+C se distinguent peu (Figure 6C). Statistiquement, seule la consistance était significativement plus élevée pour les PL+X+C ($k=0,1233$ comparativement à $0,0964$ pour PL+X, tableau 7). Le pH des solutions à cette étape était légèrement supérieur à 3 (3,1-3,2). Il était plus élevé que lors des essais précédents avec les solutions acidifiées rapidement. La composition de la PLÉ, qui comporte plus de minéraux que le CPL, fournit aux solutions fermentées un meilleur pouvoir tampon (Amiot, Fournier et al. 2002). À ce pH, les interactions électrostatiques et la formation de complexes entre les protéines et la gomme xanthane seraient encore possibles mais ne semblent pas avoir lieu étant donné la proximité de comportement entre les solutions PL+X et PL+X+C. Les sels contenus dans les yogourts et dans les solutions de digestion ne favorisent pas ces interactions. En effet, l'équipe de Higiro (2007) a mesuré que l'ajout de 5 mM de sels (NaCl, KCl ou CaCl₂) diminue les interactions entre les deux gommages, alors qu'une concentration de sels de 50mM fait disparaître les interactions synergiques et provoque même l'apparition d'une forte répulsion. Les solutions buccale et gastrique ajoutées à l'échantillon apportent environ 45 mM de ces sels.

De plus, à cette étape, les variables de modélisation des courbes ne montrent pas d'interaction polysaccharides-protéines statistiquement significative.

3.3.3.4 *Étape intestinale*

Alors qu'aux étapes buccales et gastriques les solutions PL+X et PL+X+C avaient des courbes d'écoulement semblables, à l'étape intestinale elles se différencient nettement (Figure 6D). Les solutions PL+X se démarquent particulièrement des autres solutions : la consistance a été plus élevée qu'à l'étape précédente ($k= 0,2506$ comparativement à $0,0964$ à l'étape gastrique) et le comportement pseudoplastique plus prononcé ($n=0,4702$ comparativement à $0,5734$, tableau 7). S'il y a eu complexation, le retour à un pH plus près de la neutralité ($pH\approx 6$) entraîne le bris de ces complexes, permettant à la gomme xanthane de mieux exprimer son caractère viscosifiant grâce à une meilleure hydratation. Et même sans formation initiale de complexe, les protéines et le lactose peuvent avoir empêché l'hydratation complète de la gomme xanthane. La gomme xanthane semble bien être la responsable de ce comportement, puisque dans le cas des solutions PL+X+C, dans lesquelles il y a deux fois moins de gomme xanthane, la consistance est moindre à cette

dernière étape qu'à l'étape gastrique. Le comportement pseudoplastique indique que la gomme xanthane gouverne toujours le comportement rhéologique de ces solutions, mais les interactions entre les deux gommes semblent être minimales, ce qui pourrait être dû à la présence de sels apportés par les solutions de digestion ajoutées (Higiro, Herald et al. 2007). Également, le mode de préparation des solutions ne favorisait pas les interactions entre les deux gommes. En effet, une solution mixte de ces deux gommes préparée à la température de la pièce forme un gel plus faible comparativement à la même solution ayant subi un traitement de chaleur intense (Mannion, Melia et al. 1992).

À cette dernière étape de la digestion, les solutions PL et PL+C ont adopté un comportement rhéologique pratiquement newtonien, bien que la viscosité des PL+C était supérieure (Figure 6D).

L'analyse statistique a permis de déceler qu'à cette dernière étape, le facteur concentration de protéines a un effet significatif sur la consistance moyenne des solutions (annexe 2), celle-ci étant plus élevée lorsque le taux de protéines est de 4% ($k= 0,0762$ comparativement à $0,0708$, Tableau 7) qu'à 3,5%.

3.3.4 Viscosité des solutions fermentées à un taux de cisaillement de 30 s^{-1} aux conditions simulant la digestion.

Dans la présente expérience, les solutions PL+C ont eu une viscosité supérieure à ce taux de cisaillement (1,9893 et 2,4849 Pa.s, Tableau 8), un niveau de protéines plus élevé ayant aussi donné une viscosité significativement plus élevée pour ce mélange. La viscosité des solutions PL+X+C s'est rapprochée aussi de cette valeur (1,5 Pa.s), alors que celle des PL+X a été plus faible (0,6111 et 0,7048 Pa.s, Tableau 8), tout en étant plus élevée que pour les solutions de protéines seules. Dans ces trois cas, le niveau de protéines n'a pas apporté de différence significative. La dilution apportée par la salive a beaucoup diminué la viscosité des solutions PL+C (0,3621 Pa.s), témoin du phénomène d'incompatibilité mentionné à la section 2.3.3.2. Les solutions PL+X+C et PL+X ont exhibé pratiquement la même viscosité (près de 0,25 Pa.s). À l'étape gastrique, la viscosité des solutions comprenant des PS a diminué approximativement par un facteur de 10. La solution PL+C

possédait encore la plus forte viscosité (0,0311 Pa.s), mais la différence entre celle-ci et les solutions PL+X (0,0246 Pa.s) et PL+X+C (0,0227 Pa.s) était moins considérable que dans le cas des solutions acidifiées (Tableau 6). À l'étape intestinale, la viscosité de PL+C a subi encore une baisse marquée, alors que les solutions PL+X ont été plus visqueuses qu'à l'étape gastrique, le niveau de protéines plus élevé donnant une viscosité significativement plus grande (0,0402 Pa.s comparativement à 0,0379 Pa.s, Tableau 8). Comme relevé précédemment, la meilleure hydratation du xanthane a même occasionné une augmentation de la viscosité par rapport à l'étape gastrique, malgré l'importante dilution. Le même phénomène ne s'est pas produit avec la solution PL+X+C qui, contrairement à ce qui était constaté avec les solutions acidifiées (Tableau 6), voit sa viscosité diminuer autour de 0,008 Pa.s à cette étape. Encore une fois, les minéraux apportés par la PLÉ pourraient expliquer, du moins en partie, cette différence.

Tableau 8 : Viscosité moyenne (valeurs expérimentales) des solutions fermentées à un taux de cisaillement de 30 s⁻¹ aux étapes simulant les conditions de digestion.

Solution	Concentration en polymères (%)			Viscosité ¹ (Pa.s)			
	PL	X	C	Initiale	Buccale	Gastrique	Intestinale
PL	3,5	0	0	0,1123 ^e	0,0183 ^c	0,0030 ^c	0,0009 ^e
PL	4,0	0	0	0,1424 ^e			0,0013 ^e
PL+X	3,5	0,7	0	0,6111 ^d	0,2491 ^b	0,0246 ^b	0,0379 ^b
PL+X	4,0	0,7	0	0,7048 ^d			0,0402 ^a
PL+C	3,5	0	0,7	1,9893 ^b	0,3621 ^a	0,0311 ^a	0,0063 ^d
PL+C	4,0	0	0,7	2,4849 ^a			0,0066 ^d
PL+X+C	3,5	0,35	0,35	1,5170 ^c	0,2447 ^b	0,0227 ^b	0,0085 ^c
PL+X+C	4,0	0,35	0,35	1,5390 ^c			0,0078 ^c

¹ Moyenne de deux mesures. Les données d'une même colonne avec la même lettre ne sont pas significativement différentes (p<0.05).

Les gommés alimentaires maintenant une viscosité plus grande dans des conditions mimant la digestion ont montré avoir un effet plus prononcé sur la réponse glycémique (Brenelli,

Campos et al. 1997). Étant donné que la viscosité des solutions PL+X à l'étape gastrique n'est pas beaucoup plus faible que celle de PL+C et qu'elle est beaucoup plus élevée que cette dernière et que celle des solutions PL+X+C à l'étape intestinale ($\approx 0,006$ et $0,008$ Pa.s, respectivement, Tableau 8), l'utilisation de la gomme xanthane seule dans une matrice laitière fermentée apparaît comme susceptible d'induire un effet physiologique bénéfique.

Une interaction significative des facteurs concentration en protéines et formulation a aussi été révélée pour la viscosité à 30 s^{-1} à l'étape intestinale: elle s'exprime au niveau des solutions PL+X, où la teneur plus élevée en protéines se traduit par une viscosité plus élevée.

En résumé, le type d'acidification et les ingrédients choisis affectent la formation de complexes entre les protéines et la gomme xanthane, ainsi que les interactions entre celle-ci et la gomme de caroube. La viscosité initiale des solutions fermentées (tableau 8) se révèle également supérieure à celle des solutions de même concentration mais acidifiées rapidement (tableau 3), par l'entremise de la formation d'un réseau de protéines gélifiées. Comme dans le cas de la solution CPL+X, les solutions PL+X présentent une augmentation de la viscosité à l'étape intestinale par rapport à l'étape gastrique, grâce à une hydratation favorisée par les conditions près de la neutralité. Quant aux solutions PL+X+C, elles présentent peu d'intérêt puisqu'à une concentration en polysaccharides égale, elles ne se distinguent pas des solutions PL+X en conditions buccale et gastrique, en plus d'être moins visqueuses à la fin du processus de digestion. En ne considérant que la viscosité, les solutions PL+X semblent une avenue prometteuse pour obtenir des effets physiologiques bénéfiques. Cependant, les effets associés aux fibres, même aux fibres visqueuses, reposent sur différents mécanismes qui font intervenir des caractéristiques autres que la viscosité, dont la densité énergétique et la fermentescibilité. La nature des polysaccharides et les caractéristiques de la matrice alimentaire font aussi partie des autres facteurs à considérer.

3.4 Conclusion

De cette étude, il ressort que des complexes sont formés par l'acidification rapide d'une solution CPL-X, entraînant une diminution de la viscosité de cette solution comparativement à la solution X. À de faibles vitesses de cisaillement, les solutions

contenant de la gomme de caroube exhibent une viscosité moindre que celles contenant de la gomme xanthane, mais leur comportement moins pseudoplastique fait en sorte que leur viscosité est plus élevée à une vitesse de cisaillement de 30 s^{-1} . En cours de digestion, l'augmentation du pH dans la phase intestinale libère le xanthane et permet son hydratation et éventuellement son interaction avec la caroube ajoutée au modèle. La viscosité intestinale de CPL+X se révèle en effet plus élevée que la viscosité gastrique, malgré la dilution plus importante. Dans la matrice PL-X, l'acidification lente et les minéraux provenant de la PLÉ qui interagissent avec les charges des protéines nuisent à la formation de complexes avec le xanthane. La viscosité demeure élevée et il y a interaction synergique avec la caroube ajoutée, d'où formation d'un gel ferme. En cours de digestion, la viscosité de la matrice PL-X-C diminue continuellement, contrairement à la matrice PL-X dont la viscosité augmente en phase intestinale, témoignant d'une meilleure hydratation du xanthane.

À notre connaissance, cette étude constitue la première démonstration qu'il est possible d'obtenir une augmentation de la viscosité de l'étape gastrique à l'étape intestinale en digestion *in vitro*, malgré l'importante dilution. Cette étude illustre également la complexité de prédire le comportement rhéologique d'un aliment en digestion. Les changements de pH, l'action des enzymes digestives, le jeu des interactions entre les constituants et le procédé de transformation influencent grandement le devenir de la matrice alimentaire en milieu digestif. Ce point doit être pris en considération lorsque vient le temps de développer un aliment dont la viscosité aurait le potentiel d'avoir un impact positif sur la santé des consommateurs.

Avant de développer un tel produit, l'impact du procédé industriel sur la viscosité initiale et le comportement rhéologique de la matrice laitière lors de la digestion devra être évalué. Enfin, seules des études nutritionnelles pourraient valider l'effet physiologique d'une matrice laitière enrichie en fibres.

Conclusion générale

L'hypothèse que nous voulions vérifier par cette étude était que la formation de complexes entre une fibre portant des charges électronégatives et les protéines du lait durant la fermentation d'un lait enrichi avec deux fibres à action synergique allait permettre de contrôler la viscosité initiale du yogourt, puis que le bris de ces complexes en cours de digestion allait favoriser l'interaction des deux fibres, ce qui serait marqué par une augmentation de la viscosité. L'expérience n'a pas permis de valider entièrement cette hypothèse.

À la suite de travaux préliminaires, la gomme xanthane, portant des charges électronégatives, et la gomme de caroube neutre ont été choisies pour les essais suivants dans une matrice laitière car elles interagissaient fortement à faible concentration. À cette étape, il apparaît cependant que les interactions entre les gommes sont diminuées grandement lorsqu'elles sont exposées au pH prévalant en condition gastrique. Dans une solution à base de concentré de protéines laitières acidifiée rapidement sous agitation, la formation de complexe entre la gomme xanthane et les protéines a été visible et a contribué à diminuer la viscosité, de sorte que la solution contenant les deux gommes (CPL+X+C) avait une viscosité similaire à celle de la gomme xanthane sous forme non complexée. Lors de la digestion, la solution CPL+X+C a subi une dilution par les sucs gastriques ajoutés et les interactions entre les deux gommes ne se sont pas manifestées avant l'étape intestinale, où l'augmentation du pH a permis leur interaction se traduisant par une augmentation marquée de la viscosité. À cette étape, l'hypothèse de départ semble donc partiellement valide car les interactions ont été favorisées lors d'une seule étape de la digestion. Par contre, dans une matrice laitière fermentée, en utilisant un lait reconstitué à partir de poudre de lait écrémé. La lente fermentation lactique n'a pas permis de constater la formation de complexe entre la gomme xanthane et les protéines. Il y a eu une augmentation de la viscosité due à la formation d'un réseau continu de protéines gélifiées. Contrairement à la solution CPL+X+C, la solution PL+X+C a vu sa viscosité diminuer à toutes les étapes de la digestion. L'hypothèse n'a donc pu être vérifiée. La présence de plus de minéraux dans la solution PL et la fermentation lente semblent avoir limité à la fois la

formation de complexe entre la gomme xanthane et les protéines et les interactions entre les deux gommes. Par contre, l'augmentation de la viscosité de la solution PL+X à l'étape intestinale indique qu'il y a des interactions entre le polysaccharide et les protéines et que celles-ci sont inhibées par l'hydrolyse des protéines et surtout par le retour à un pH plus proche de la neutralité, permettant à la gomme xanthane de pleinement s'hydrater et d'exhiber son pouvoir viscosifiant. Il apparaît donc possible de manipuler la viscosité des aliments en cours de digestion.

Cette étude a été faite en vue de comprendre le comportement rhéologique en cours de digestion d'un yogourt enrichi en fibres, sachant que la viscosité des aliments exhibée lors de la digestion est l'un des mécanismes reconnus comme pouvant favoriser la satiété. La formulation de la recette et le procédé de fabrication influencent grandement ce comportement. Actuellement, la réglementation canadienne n'autorise pas d'allégation sur les aliments en lien avec la satiété, mais un document d'orientation provisoire publié à ce sujet en 2012 pour fins de consultation publique semble démontrer une certaine ouverture de Santé Canada à ce sujet. Toutefois, bien que certains auteurs aient pu démontrer un effet de la viscosité ou de certaines fibres sur la satiété, et même si une digestion simulée semblait indiquer que l'enrichissement en fibres permet de modifier la viscosité, seule une étude nutritionnelle clinique pourrait permettre de confirmer qu'un aliment précis soit satiétogène.

Bibliographie

- Acton, J. C., L. Breyer, et al. (1982). "Effect of dietary fiber constituents on the in vitro digestibility of casein." Journal of Food Science **47**(2): 556-560.
- Agence canadienne d'inspection des aliments. (2009). "Guide d'étiquetage et de publicité sur les aliments."
<http://www.inspection.gc.ca/francais/fssa/labeti/guide/ch6af.shtml#tab6-12> Tel que consulté le 10 novembre 2009.
- Agoub, A. A., P. Giannouli, et al. (2009). "Gelation of high methoxy pectin by acidification with D-glucono- delta-lactone (GDL) at room temperature." Carbohydrate Polymers **75**(2): 269-281.
- Agoub, A. A., A. M. Smith, et al. (2007). ""Melt-in-the-mouth" gels from mixtures of xanthan and konjac glucomannan under acidic conditions: A rheological and calorimetric study of the mechanism of synergistic gelation." Carbohydrate Polymers **69**(4): 713-724.
- Almiron-Roig, E., D. Grathwohl, et al. (2009). "Impact of some isoenergetic snacks on satiety and next meal intake in healthy adults." J Hum Nutr Diet **22**(5): 469-74.
- Amiot, J., S. Fournier, et al. (2002). Composition, propriétés physicochimiques, valeur nutritive, qualité technologique et techniques d'analyse du lait. Science et technologie du lait. Transformation du lait. . C. L. Vignola. Montréal, Presses Internationales Polytechnique: 1-73.
- Anderson, J. W., P. Baird, et al. (2009). "Health benefits of dietary fiber." Nutr Rev **67**(4): 188-205.
- Anis, A. H., W. Zhang, et al. (2009). "Obesity and overweight in Canada: an updated cost-of-illness study." Obes Rev: 1-10.
- Archer, B. J., S. K. Johnson, et al. (2004). "Effect of fat replacement by inulin or lupin-kernel fibre on sausage patty acceptability, post-meal perceptions of satiety and food intake in men." Br J Nutr **91**(4): 591-9.
- Ascherio, A., C. Hennekens, et al. (1996). "Prospective study of nutritional factors, blood pressure, and hypertension among US women." Hypertension **27**(5): 1065-72.
- Astrup, A., E. Vrist, et al. (1990). "Dietary fibre added to very low calorie diet reduces hunger and alleviates constipation." Int J Obes **14**(2): 105-12.
- Aymard, P., A. Lluch, et al. (2006). Produits laitiers frais à pouvoir satiétogène à base de fibres hydrosolubles et procédés de préparation. French Patent Application. FR 2 887 121: 39 p.
- Aymard, P., O. Noble, et al. (2009). Nouveau produit alimentaire fonctionnel comprenant un mélange spécifique de fibres. French Patent Application FR 2 917 949: 48.
- Babio, N., R. Balanza, et al. (2010). "Dietary fibre: influence on body weight, glycemic control and plasma cholesterol profile." Nutr Hosp **25**(3): 327-40.
- Ball, S. D., K. R. Keller, et al. (2003). "Prolongation of satiety after low versus moderately high glycemic index meals in obese adolescents." Pediatrics **111**(3): 488-94.
- Battilana, P., K. Ornstein, et al. (2001). "Mechanisms of action of beta-glucan in postprandial glucose metabolism in healthy men." Eur J Clin Nutr **55**(5): 327-33.

- Bays, H., J. Frestedt, et al. (2011). "Reduced viscosity Barley beta-Glucan versus placebo: a randomized controlled trial of the effects on insulin sensitivity for individuals at risk for diabetes mellitus." Nutrition & Metabolism **8**(1): 58.
- Bellisle, F. (2005). "Faim et satiété, contrôle de la prise alimentaire." EMC - Endocrinologie **2**(4): 179-197.
- Bellisle, F. (2008). "Functional foods and the satiety cascade." Nutrition Bulletin **33**(1): 8-14.
- Bellisle, F. (2009). "Deux questionnaires validés pour mesurer des aspects de la motivation à manger qui peuvent affecter le contrôle pondéral." L'Encéphale **35**(2): 182-185.
- Bellissimo, N., P. B. Pencharz, et al. (2007). "Effect of television viewing at mealtime on food intake after a glucose preload in boys." Pediatr Res **61**(6): 745-9.
- Benini, L., G. Castellani, et al. (1995). "Gastric emptying of a solid meal is accelerated by the removal of dietary fibre naturally present in food." Gut **36**(6): 825-30.
- Bertenshaw, E. J., A. Lluch, et al. (2008). "Satiating effects of protein but not carbohydrate consumed in a between-meal beverage context." Physiol Behav **93**(3): 427-36.
- Beyer, P. L. (2004). Digestion, Absorption, Transport, and Excretion of Nutrients. Krause's Food, Nutrition, and Diet Therapy. L. K. Mahan et S. Escott-Stump. Philadelphia, W.B. Saunders: 2-20.
- Birmingham, C. L., J. L. Muller, et al. (1999). "The cost of obesity in Canada." CMAJ **160**(4): 483-8.
- Blundell, J., C. de Graaf, et al. (2010). "Appetite control: methodological aspects of the evaluation of foods." Obes Rev.
- Blundell, J. E. and V. J. Burley (1987). "Satiating, satiety and the action of fibre on food intake." Int J Obes **11 Suppl 1**: 9-25.
- Bourdon, I., W. Yokoyama, et al. (1999). "Postprandial lipid, glucose, insulin, and cholecystokinin responses in men fed barley pasta enriched with beta-glucan." Am J Clin Nutr **69**(1): 55-63.
- Boyd, M. J. (2005). The phase behaviour of xanthan based biopolymer mixtures. School of Pharmacy. Nottingham, The University of Nottingham. **Doctor**: 295 p.
- Brenelli, S. L., S. D. Campos, et al. (1997). "Viscosity of gums in vitro and their ability to reduce postprandial hyperglycemia in normal subjects." Braz J Med Biol Res **30**(12): 1437-40.
- Brown, L., B. Rosner, et al. (1999). "Cholesterol-lowering effects of dietary fiber: a meta-analysis." Am J Clin Nutr **69**(1): 30-42.
- Brown, W. J., L. Williams, et al. (2005). "Identifying the energy gap: magnitude and determinants of 5-year weight gain in midage women." Obes Res **13**(8): 1431-41.
- Brunstrom, J. M., N. G. Shakeshaft, et al. (2008). "Measuring 'expected satiety' in a range of common foods using a method of constant stimuli." Appetite **51**(3): 604-614.
- Burton-Freeman, B. (2000). "Dietary fiber and energy regulation." J Nutr **130**(2S Suppl): 272S-275S.
- Cani, P. D., E. Joly, et al. (2006). "Oligofructose promotes satiety in healthy human: a pilot study." European Journal of Clinical Nutrition **60**(5): 567-572.
- Capel, F., T. Nicolai, et al. (2006). "Calcium and acid induced gelation of (amidated) low methoxyl pectin." Food Hydrocolloids **20**(6): 901-907.
- Cherbut, C. (2003). "Motor effects of short-chain fatty acids and lactate in the gastrointestinal tract." Proc Nutr Soc **62**(1): 95-9.

- Cox, P. W., F. Spyropoulos, et al. (2009). Effect of Processing on Biopolymer Interactions. Modern Biopolymer Science. San Diego, Academic Press: 199-224.
- Cummings, J. H. and H. N. Englyst (1991). "What is dietary fibre?" Trends in Food Science & Technology **2**: 99-103.
- Dangin, M., Y. Boirie, et al. (2002). "Influence of the protein digestion rate on protein turnover in young and elderly subjects." J Nutr **132**(10): 3228S-33S.
- de Kruif, C. G. and R. Tuinier (2001). "Polysaccharide protein interactions." Food Hydrocolloids **15**(4-6): 555-563.
- de Kruif, C. G., F. Weinbreck, et al. (2004). "Complex coacervation of proteins and anionic polysaccharides." Current Opinion in Colloid & Interface Science **9**(5): 340-349.
- De Ruiter, G. A. and B. Rudolph (1997). "Carrageenan biotechnology." Trends in Food Science & Technology **8**(12): 389-395.
- Dea, I. C. M., A. Morrison, et al. (1975). Chemistry and Interactions of Seed Galactomannans. Advances in Carbohydrate Chemistry and Biochemistry. New York, Academic Press. **31**: 241-312.
- Dikeman, C. L., M. R. Murphy, et al. (2006). "Dietary fibers affect viscosity of solutions and simulated human gastric and small intestinal digesta." J Nutr **136**(4): 913-9.
- Doublier, J. L., C. Garnier, et al. (2000). "Protein-polysaccharide interactions." Current Opinion in Colloid & Interface Science **5**(3-4): 202-214.
- Dove, E. R., J. M. Hodgson, et al. (2009). "Skim milk compared with a fruit drink acutely reduces appetite and energy intake in overweight men and women." Am J Clin Nutr **90**(1): 70-5.
- Draget, K. I. (2000). Alginates. Handbook of hydrocolloids. G. O. Phillips et P. A. Williams. Boca Raton, CRC Press: 379-396.
- Draget, K. I., O. Smidsrod, et al. (2005). Alginates from Algae. Polysaccharides and Polyamides in the Food Industry. A. Steinbüchel et S. K. Rhee. Weinheim, Wiley-VCH: 1-30.
- Drewnowski, A., E. Almiron-Roig, et al. (2004). "Dietary energy density and body weight: is there a relationship?" Nutr Rev **62**(11): 403-13.
- Edwards, C. A., N. A. Blackburn, et al. (1987). "Viscosity of food gums determined in vitro related to their hypoglycemic actions." Am J Clin Nutr **46**(1): 72-77.
- Ello-Martin, J. A., L. S. Roe, et al. (2007). "Dietary energy density in the treatment of obesity: a year-long trial comparing 2 weight-loss diets." Am J Clin Nutr **85**(6): 1465-77.
- Endreß, H.-U. and S. H. Christensen (2009). Pectins. Handbook of hydrocolloids. G. O. Phillips et P. A. Williams. Boca Raton, CRC Press: 274-297.
- Fitzsimons, S. M., J. T. Tobin, et al. (2008). "Synergistic binding of konjac glucomannan to xanthan on mixing at room temperature." Food Hydrocolloids **22**(1): 36-46.
- Flourie, B., N. Vidon, et al. (1984). "Effect of pectin on jejunal glucose absorption and unstirred layer thickness in normal man." Gut **25**(9): 936-41.
- Foster, T. J. and I. T. Norton (2009). Self-assembling structures in the gastrointestinal tract. Designing functional foods. Measuring and controlling food structure breakdown and nutrient absorption. D. J. McClements et E. A. Decker. Boca Raton, Woodhead Publishing Limited and CRC Press: 601-622.
- French, S. J. and N. W. Read (1994). "Effect of guar gum on hunger and satiety after meals of differing fat content: relationship with gastric emptying." Am J Clin Nutr **59**(1): 87-91.

- Ghotra, B. S., T. Vasanthan, et al. (2009). "Rheological properties of aqueous blends of high purity barley β -glucan with high purity commercial food gums." Food Chemistry **117**(3): 417-425.
- Giacosa, A. and M. Rondanelli (2010). "The Right Fiber for the Right Disease: An Update on the Psyllium Seed Husk and the Metabolic Syndrome." J Clin Gastroenterol **44**, Suppl 1: S58-60.
- Gilbert, J. A., D. R. Joannise, et al. (2011). "Milk supplementation facilitates appetite control in obese women during weight loss: a randomised, single-blind, placebo-controlled trial." Br J Nutr **105**(1): 133-43.
- Gilsenan, P. M., R. K. Richardson, et al. (2000). "Thermally reversible acid-induced gelation of low-methoxy pectin." Carbohydrate Polymers **41**(4): 339-349.
- Girard, M., S. L. Turgeon, et al. (2002). "Interbiopolymer complexing between [β]-lactoglobulin and low- and high-methylated pectin measured by potentiometric titration and ultrafiltration." Food Hydrocolloids **16**(6): 585-591.
- Goetze, O., A. Steingoetter, et al. (2007). "The effect of macronutrients on gastric volume responses and gastric emptying in humans: A magnetic resonance imaging study." Am J Physiol Gastrointest Liver Physiol **292**(1): G11-7.
- Graaf, C. d., W. A. M. Blom, et al. (2004). "Biomarkers of satiation and satiety." American Journal of Clinical Nutrition **79**(6): 946-961.
- Grabitske, H. A. and J. L. Slavin (2009). "Gastrointestinal effects of low-digestible carbohydrates." Crit Rev Food Sci Nutr **49**(4): 327-60.
- Greenway, F., C. E. O'Neil, et al. (2007). "Fourteen weeks of treatment with Viscofiber increased fasting levels of glucagon-like peptide-1 and peptide-YY." J Med Food **10**(4): 720-4.
- Harper, A., A. James, et al. (2007). "Increased satiety after intake of a chocolate milk drink compared with a carbonated beverage, but no difference in subsequent ad libitum lunch intake." British Journal of Nutrition **97**(3): 579-583.
- Hays, N. P. and S. B. Roberts (2008). "Aspects of eating behaviors "disinhibition" and "restraint" are related to weight gain and BMI in women." Obesity (Silver Spring) **16**(1): 52-8.
- He, M., R. M. van Dam, et al. (2010). "Whole-grain, cereal fiber, bran, and germ intake and the risks of all-cause and cardiovascular disease-specific mortality among women with type 2 diabetes mellitus." Circulation **121**(20): 2162-8.
- Heini, A. F., C. Lara-Castro, et al. (1998). "Effect of hydrolyzed guar fiber on fasting and postprandial satiety and satiety hormones: a double-blind, placebo-controlled trial during controlled weight loss." Int J Obes Relat Metab Disord **22**(9): 906-9.
- Hemar, Y., M. Tamehana, et al. (2001). "Viscosity, microstructure and phase behavior of aqueous mixtures of commercial milk protein products and xanthan gum." Food Hydrocolloids **15**(4-6): 565-574.
- Hetherington, M. M., A. S. Anderson, et al. (2006). "Situational effects on meal intake: A comparison of eating alone and eating with others." Physiol Behav **88**(4-5): 498-505.
- Hetherington, M. M., R. Foster, et al. (2006). "Understanding variety: tasting different foods delays satiation." Physiol Behav **87**(2): 263-71.
- Higiro, J., T. J. Herald, et al. (2007). "Rheological study of xanthan and locust bean gum interaction in dilute solution: Effect of salt." Food Research International **40**(4): 435-447.

- Hoad, C. L., P. Rayment, et al. (2004). "In vivo imaging of intragastric gelation and its effect on satiety in humans." J Nutr **134**(9): 2293-300.
- Horne, D. S. (2009). Casein micelle structure and stability. Milk Proteins- from Expression to Food. A. Thompson, M. Boland et H. Singh, Elsevier: 133-162.
- Howarth, N. C., E. Saltzman, et al. (2003). "Fermentable and nonfermentable fiber supplements did not alter hunger, satiety or body weight in a pilot study of men and women consuming self-selected diets." J Nutr **133**(10): 3141-4.
- Hull, S. and R. Re (2010). "Satiety methodology." NutraCos **9**(1): 25-28.
- Jenkins, A. L., D. J. Jenkins, et al. (2008). "Comparable postprandial glucose reductions with viscous fiber blend enriched biscuits in healthy subjects and patients with diabetes mellitus: acute randomized controlled clinical trial." Croat Med J **49**(6): 772-82.
- Jenkins, A. L., V. Kacinik, et al. (2010). "Reduction of postprandial glycemia by the novel viscous polysaccharide PGX, in a dose-dependent manner, independent of food form." J Am Coll Nutr **29**(2): 92-8.
- Keogh, M. K. and B. T. O'Kennedy (1998). "Rheology of stirred yogurt as affected by added milk fat, protein and hydrocolloids." Journal of Food Science **63**(1): 108-112.
- Kopf-Bolanz, K. A., F. Schwander, et al. (2012). "Validation of an in vitro digestive system for studying macronutrient decomposition in humans." The Journal of Nutrition **142**: 245-250.
- Kristensen, M. and M. G. Jensen (2011). "Dietary fibres in the regulation of appetite and food intake. Importance of viscosity." Appetite **56**(1): 65-70.
- Krotkiewski, M. (1984). "Effect of guar gum on body-weight, hunger ratings and metabolism in obese subjects." Br J Nutr **52**(1): 97-105.
- Lairon, D., N. Arnault, et al. (2005). "Dietary fiber intake and risk factors for cardiovascular disease in French adults." Am J Clin Nutr **82**(6): 1185-94.
- Lamghari-El-Kossori, R., C. Sanchez, et al. (2000). "Comparison of effects of prickly pear (*Opuntia ficus indica* sp) fruit, arabic gum, carrageenan, alginic acid, locust bean gum and citrus pectin on viscosity and in vitro digestibility of casein." Journal of the Science of Food & Agriculture **80**(3): 359-364.
- Laneuville, S. I., P. Paquin, et al. (2000). "Effect of preparation conditions on the characteristics of whey protein--xanthan gum complexes." Food Hydrocolloids **14**(4): 305-314.
- Lapasin, R. and S. Pricl (1995). Rheology of industrial polysaccharides: Theory and applications. London and New York, Blackie Academic & Professional, 620 p.
- Le Magnen, J. (1992). Neurobiology of feeding and nutrition. London, Academic Press, 385 p.
- Leclere, C. J., M. Champ, et al. (1994). "Role of viscous guar gums in lowering the glycemic response after a solid meal." Am J Clin Nutr **59**(4): 914-21.
- Liu, S., M. J. Stampfer, et al. (1999). "Whole-grain consumption and risk of coronary heart disease: results from the Nurses' Health Study." Am J Clin Nutr **70**(3): 412-9.
- Liu, S., W. C. Willett, et al. (2000). "A prospective study of dietary glycemic load, carbohydrate intake, and risk of coronary heart disease in US women." Am J Clin Nutr **71**(6): 1455-61.
- Lluch, A., N. Hanet-Geisen, et al. (2010). "Short-term appetite-reducing effects of a low-fat dairy product enriched with protein and fibre." Food Quality & Preference **21**(4): 402-209.

- Lucey, J. A., M. Tamehana, et al. (1998). "A comparison of the formation, rheological properties and microstructure of acid skim milk gels made with a bacterial culture or glucono- delta-lactone." Food Research International **31**(2): 147-155.
- Major, G. C., J. P. Chaput, et al. (2008). "Recent developments in calcium-related obesity research." Obes Rev **9**(5): 428-45.
- Maljaars, P. W., H. P. Peters, et al. (2008). "Ileal brake: a sensible food target for appetite control. A review." Physiol Behav **95**(3): 271-81.
- Mannion, R. O., C. D. Melia, et al. (1992). "Xanthan/locust bean gum interactions at room temperature." Carbohydrate Polymers **19**(2): 91-97.
- Marciani, L., P. A. Gowland, et al. (2001). "Assessment of antral grinding of a model solid meal with echo-planar imaging." Am J Physiol Gastrointest Liver Physiol **280**(5): G844-9.
- Marciani, L., P. A. Gowland, et al. (2000). "Gastric response to increased meal viscosity assessed by echo-planar magnetic resonance imaging in humans." J Nutr **130**(1): 122-7.
- Marlett, J. A. (1997). Sites and mechanisms for the hypocholesterolemic actions of soluble dietary fiber sources. Dietary Fiber in Health and Disease. D. Kritchevsky et C. Bonfield. New York, Plenum Press: 109-121.
- Marlett, J. A., K. B. Hosig, et al. (1994). "Mechanism of serum cholesterol reduction by oat bran." Hepatology **20**(6): 1450-7.
- Marteau, P., B. Flourie, et al. (1990). "Effect of the microbial lactase (EC 3.2.1.23) activity in yoghurt on the intestinal absorption of lactose: an in vivo study in lactase-deficient humans." Br J Nutr **64**(1): 71-9.
- Mattes, R. D. and D. Rothacker (2001). "Beverage viscosity is inversely related to postprandial hunger in humans." Physiology & Behavior **74**(4-5): 551-557.
- Mattison, K. W., P. L. Dubin, et al. (1998). "Complex Formation between Bovine Serum Albumin and Strong Polyelectrolytes: Effect of Polymer Charge Density." The Journal of Physical Chemistry B **102**(19): 3830-3836.
- Mayer, J. (1953). "Glucostatic mechanism of regulation of food intake." N Engl J Med **249**(1): 13-6.
- Meyer, J. H., Y. G. Gu, et al. (1988). "Intragastric vs intrainestinal viscous polymers and glucose tolerance after liquid meals of glucose." Am J Clin Nutr **48**(2): 260-6.
- Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation (2009). Portrait sommaire de l'industrie laitière québécoise. Direction des politiques commerciales et intergouvernementales. Québec: 60 p.
- Morris, E. R. and T. J. Foster (1994). "Role of conformation in synergistic interactions of xanthan." Carbohydrate Polymers **23**(2): 133-135.
- Morris, E. R., D. A. Rees, et al. (1977). "Order-disorder transition for a bacterial polysaccharide in solution. A role for polysaccharide conformation in recognition between Xanthomonas pathogen and its plant host." Journal of Molecular Biology **110**(1): 1-16.
- Mouécoucou, J., C. Villaume, et al. (2004). "[beta]-Lactoglobulin/polysaccharide interactions during in vitro gastric and pancreatic hydrolysis assessed in dialysis bags of different molecular weight cut-offs." Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects **1670**(2): 105-112.
- Naslund, E. and P. M. Hellstrom (2007). "Appetite signaling: from gut peptides and enteric nerves to brain." Physiol Behav **92**(1-2): 256-62.

- Norton, I. T., W. J. Frith, et al. (2006). "Fluid gels, mixed fluid gels and satiety." Food Hydrocolloids **20**(2, 3): 229-239.
- Osilesi, O., D. L. Trout, et al. (1985). "Use of xanthan gum in dietary management of diabetes mellitus." Am J Clin Nutr **42**(4): 597-603.
- Panahi, S., A. Ezatagha, et al. (2007). "Beta-glucan from two sources of oat concentrates affect postprandial glycemia in relation to the level of viscosity." J Am Coll Nutr **26**(6): 639-44.
- Paquin, J. (2008). Étude de l'effet de la consommation d'un jus enrichi en fibres alimentaires sur la satiété et la réponse glycémique. Département Sciences des aliments et Nutrition, Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation. Québec, Université Laval. **Maîtrise**: 70p.
- Penna, A. L. B., A. Converti, et al. (2006). "Simultaneous Effects of Total Solids Content, Milk Base, Heat Treatment Temperature and sample Temperature on the Rheological Properties of Plain Stirred Yogurt." Food Technol. Biotechnol. **44**(4): 515-518.
- Pereira, M. A. and D. S. Ludwig (2001). "Dietary fiber and body-weight regulation. Observations and mechanisms." Pediatr Clin North Am **48**(4): 969-80.
- Perrigue, M. M., P. Monsivais, et al. (2009). "Added soluble fiber enhances the satiating power of low-energy-density liquid yogurts." J Am Diet Assoc **109**(11): 1862-8.
- Publications du Québec. (2009). "Règlement sur les aliments (L.R.Q., c. P-29, a. 40)." <http://www.canlii.org/fr/qc/legis/regl/rq-c-p-29-r1/derniere/rq-c-p-29-r1.html#history> Tel que consulté le 11 novembre 2009.
- Queenan, K. M., M. L. Stewart, et al. (2007). "Concentrated oat beta-glucan, a fermentable fiber, lowers serum cholesterol in hypercholesterolemic adults in a randomized controlled trial." Nutr J **6**(6): 1-8.
- Rao, M. A. (2007). Rheology of Fluid and Semisolid Foods: Principles and Applications. New York, Springer, 481p.
- Repin, N., M. G. Scanlon, et al. (2012). "Phase behaviour of casein micelles and barley beta-glucan polymer molecules in dietary fibre-enriched dairy systems." Journal of Colloid and Interface Science **377**(1): 7-12.
- Rinaudo, M. and A. Moroni (2009). "Rheological behavior of binary and ternary mixtures of polysaccharides in aqueous medium." Food Hydrocolloids **23**(7): 1720-1728.
- Rioux, L.-E. and S. Turgeon (2012). "The Ratio of Casein to Whey Protein Impacts Yogurt Digestion In Vitro." Food Digestion **3**(1-3): 25-35.
- Rolls, B. J., E. A. Bell, et al. (1999). "Water incorporated into a food but not served with a food decreases energy intake in lean women." Am J Clin Nutr **70**(4): 448-55.
- Rolls, B. J., V. H. Castellanos, et al. (1998). "Volume of food consumed affects satiety in men." Am J Clin Nutr **67**(6): 1170-7.
- Sanaka, M., T. Yamamoto, et al. (2007). "Effects of agar and pectin on gastric emptying and post-prandial glycaemic profiles in healthy human volunteers." Clin Exp Pharmacol Physiol **34**(11): 1151-5.
- Sanchez, C., R. Zuniga-Lopez, et al. (2000). "Microstructure of acid-induced skim milk-locust bean gum-xanthan gels." International Dairy Journal **10**(3): 199-212.
- Sandhu, K. S., M. M. El Samahi, et al. (1987). "Effect of Pectin on Gastric Emptying and Gastrointestinal Motility in Normal Subjects." Gastroenterology **92**: 486-492.

- Sandolo, C., D. Bulone, et al. (2010). "Synergistic interaction of Locust Bean Gum and Xanthan investigated by rheology and light scattering." Carbohydrate Polymers **82**(3): 733-741.
- Sanggaard, K. M., J. J. Holst, et al. (2004). "Different effects of whole milk and a fermented milk with the same fat and lactose content on gastric emptying and postprandial lipaemia, but not on glycaemic response and appetite." Br J Nutr **92**(3): 447-59.
- Santé Canada (2010). Politique proposée: Définition et valeur énergétique des fibres alimentaires. Bureau des sciences de la nutrition. Direction des aliments. Direction générale des produits de santé et des aliments. Ottawa: 35 pages.
- Santé Canada (2012). Politique sur l'étiquetage et la publicité des produits alimentaires contenant des fibres alimentaires. . Bureau des Sciences de la nutrition: 20 pages.
- Schmitt, C. and S. L. Turgeon (2011). "Protein/polysaccharide complexes and coacervates in food systems." Advances in Colloid and Interface Science **167**(1-2): 63-70.
- Schorsch, C., M. G. Jones, et al. (1999). "Thermodynamic incompatibility and microstructure of milk protein/locust bean gum/sucrose systems." Food Hydrocolloids **13**(2): 89-99.
- Schwartz, S. E., R. A. Levine, et al. (1982). "Sustained pectin ingestion delays gastric emptying." Gastroenterology **83**(4): 812-7.
- Singh, M., S. Kim, et al. (2012). "Effect of purified oat beta-glucan on fermentation of set-style yogurt mix." Journal of Food Science **77**(8): E195-E201.
- Slavin, J. and H. Green (2007). "Dietary fibre and satiety." Nutrition Bulletin **32**(1): 32-42.
- Slavin, J. L. (2005). "Dietary fiber and body weight." Nutrition **21**(3): 411-8.
- Slavin, J. L. (2008). "Position of the American Dietetic Association: health implications of dietary fiber." J Am Diet Assoc **108**(10): 1716-31.
- Smith, A. K. and B. E. Campbell (2007). Microstructure of Milk Components. Structure of Dairy Products. A. Y. Tamime, John Wiley & Sons: 39-71.
- Sriamornsak, P. and N. Wattanakorn (2008). "Rheological synergy in aqueous mixtures of pectin and mucin." Carbohydrate Polymers **74**(3): 474-481.
- Statistique Canada. Division de l'agriculture. (2010). Statistiques sur les aliments (21-020-X). Ottawa, Ministère de l'Industrie: 45p.
- Stewart, M. L., S. D. Nikhanj, et al. (2010). "Evaluation of the effect of four fibers on laxation, gastrointestinal tolerance and serum markers in healthy humans." Ann Nutr Metab **56**(2): 91-8.
- Stubbs, R. J. and S. Whybrow (2004). "Energy density, diet composition and palatability: influences on overall food energy intake in humans." Physiol Behav **81**(5): 755-64.
- Sworn, G. (2009). Xanthan gum. Handbook of hydrocolloids. G. O. Phillips et P. A. Williams. Boca Raton, CRC Press: 186-203.
- Sworn, G. (2010). Xanthan Gum. Food Stabilisers, thickeners and gelling agents. A. Imeson. Ames, Wiley-Blackwell Pub.: 325-342.
- Tamime, A. Y. (2006). Fermented Milks. Oxford, Blackwell Science, 262.
- Tamime, A. Y., A. Hassan, et al. (2007). Structure of Fermented Milks. Structure of Dairy Products. A. Y. Tamime, John Wiley & Sons: 134-169.
- Tamime, A. Y. and R. K. Robinson (2007). Tamime and Robinson's Yoghurt - Science and Technology Boca Raton, CRC, 791.
- Tiway, C. M., J. A. Ward, et al. (1997). "Effect of pectin on satiety in healthy US Army adults." J Am Coll Nutr **16**(5): 423-8.

- Tjepkema, M. (2005). Obésité mesurée. Obésité chez les adultes au Canada: Poids et grandeur mesurés. Nutrition: Résultats de l'Enquête sur la santé dans les collectivités canadiennes. Statistique Canada. Ottawa.
- Torsdottir, I., M. Alpsten, et al. (1989). "Dietary guar gum effects on postprandial blood glucose, insulin and hydroxyproline in humans." J Nutr **119**(12): 1925-31.
- Torsdottir, I., M. Alpsten, et al. (1991). "A small dose of soluble alginate-fiber affects postprandial glycemia and gastric emptying in humans with diabetes." J Nutr **121**(6): 795-9.
- Tsuchiya, A., E. Almiron-Roig, et al. (2006). "Higher satiety ratings following yogurt consumption relative to fruit drink or dairy fruit drink." Journal of the American Dietetic Association **106**(4): 550-557.
- Turgeon, S. L., M. Beaulieu, et al. (2003). "Protein-polysaccharide interactions: phase-ordering kinetics, thermodynamic and structural aspects." Current Opinion in Colloid & Interface Science **8**(4-5): 401-414.
- Turgeon, S. L., S. I. Laneuville, et al. (2009). Protein + Polysaccharide Coacervates and Complexes: From Scientific Background to their Application as Functional Ingredients in Food Products. Modern Biopolymer Science. San Diego, Academic Press: 327-363.
- Turquois, T., F.-R. Taravel, et al. (1993). "Synergy of the agarose-carob galactomannan blend inferred from NMR and rheological studies." Carbohydrate Research **238**: 27-38.
- Vartanian, L. R., C. P. Herman, et al. (2008). "Are we aware of the external factors that influence our food intake?" Health Psychol **27**(5): 533-8.
- Versantvoort, C. H., A. G. Oomen, et al. (2005). "Applicability of an in vitro digestion model in assessing the bioaccessibility of mycotoxins from food." Food Chem Toxicol **43**(1): 31-40.
- Vuksan, V., A. L. Jenkins, et al. (2008). "Using cereal to increase dietary fiber intake to the recommended level and the effect of fiber on bowel function in healthy persons consuming North American diets." Am J Clin Nutr **88**(5): 1256-62.
- Vuksan, V., D. J. Jenkins, et al. (1999). "Konjac-mannan (glucomannan) improves glycemia and other associated risk factors for coronary heart disease in type 2 diabetes. A randomized controlled metabolic trial." Diabetes Care **22**(6): 913-9.
- Walsh, D. E., V. Yaghoubian, et al. (1984). "Effect of glucomannan on obese patients: a clinical study." Int J Obes **8**(4): 289-93.
- Wang, Q., P. R. Ellis, et al. (2000). "The stability of guar gum in an aqueous system under acidic conditions." Food Hydrocolloids **14**(2): 129-134.
- WHO. (2006). "Aide-mémoire N°311: Obésité et surpoids." <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs311/fr/index.html> Tel que consulté le 26 août 2008.
- Wielinga, W. C. (2009). Galactomannans. Handbook of hydrocolloids. G. O. Phillips et P. A. Williams. Boca Raton, CRC Press: 228-251.
- Williams, J. A., C. S. Lai, et al. (2004). "Inclusion of guar gum and alginate into a crispy bar improves postprandial glycemia in humans." J Nutr **134**(4): 886-9.
- Wilmshurst, P. and J. C. Crawley (1980). "The measurement of gastric transit time in obese subjects using ²⁴Na and the effects of energy content and guar gum on gastric emptying and satiety." Br J Nutr **44**(1): 1-6.

- Wolever, T. M., S. M. Tosh, et al. (2010). "Physicochemical properties of oat beta-glucan influence its ability to reduce serum LDL cholesterol in humans: a randomized clinical trial." Am J Clin Nutr **92**(4): 723-32.
- Wolf, B. W., C. S. Lai, et al. (2002). "Glycemic and insulinemic responses of nondiabetic healthy adult subjects to an experimental acid-induced viscosity complex incorporated into a glucose beverage." Nutrition **18**(7-8): 621-6.
- Wolf, B. W., T. M. Wolever, et al. (2003). "Effects of a beverage containing an enzymatically induced-viscosity dietary fiber, with or without fructose, on the postprandial glycemic response to a high glycemic index food in humans." Eur J Clin Nutr **57**(9): 1120-7.
- Wolk, A., J. E. Manson, et al. (1999). "Long-term intake of dietary fiber and decreased risk of coronary heart disease among women." JAMA **281**(21): 1998-2004.
- Wood, P. J., M. U. Beer, et al. (2000). "Evaluation of role of concentration and molecular weight of oat beta-glucan in determining effect of viscosity on plasma glucose and insulin following an oral glucose load." Br J Nutr **84**(1): 19-23.
- Wood, P. J., J. T. Braaten, et al. (1994). "Effect of dose and modification of viscous properties of oat gum on plasma glucose and insulin following an oral glucose load." Br J Nutr **72**(5): 731-43.
- Yao, M. and S. B. Roberts (2001). "Dietary energy density and weight regulation." Nutr Rev **59**(8 Pt 1): 247-58.
- Zijlstra, N., M. Mars, et al. (2008). "The effect of viscosity on ad libitum food intake." Int J Obes (Lond) **32**(4): 676-83.

Annexe 1 : Modèle de digestion in vitro : composition des solutions utilisées et déroulement

La composition des solutions utilisées pour la digestion in vitro provient de Versantvoort et al, 2005.

A- Solutions de base préparées à l'avance

	Salive	Solution gastrique	Solution duodénale	Bile
Solution inorganique	10 mL KCl 89,6 g/L	15,7 mL NaCl 175,3 g/L	40 mL NaCl 175,3 g/L	30 mL NaCl 175,3 g/L
	10 mL KSCN 20 g/L	3 mL NaH ₂ PO ₄ 88,8 g/L	40 mL NaHCO ₃ 84,7 g/L	68,3 mL NaHCO ₃ 84,7 g/L
	10 mL NaH ₂ PO ₄ 88,8 g/L	9,2 mL KCl 89,6 g/L	10 mL KH ₂ PO ₄ 8 g/L	4,2 mL KCl 89,6 g/L
	10 mL NaSO ₄ 57 g/L	18 mL CaCl ₂ ·2H ₂ O 22,2 g/L	6,3 mL KCl 89,6 g/L	150 µL HCl 37% g/g
	1,7 mL NaCl 175,3 g/L	10 mL NH ₄ Cl 30,6 g/L	10 mL MgCl ₂ 5 g/L	
	20 mL NaHCO ₃ 84,7 g/L	6,5 mL HCl 37% g/g	180 µL HCl 37% g/g	
	Compléter le volume de chaque solution à 500 mL			
Solution organique	8 mL urée 25 g/L	10 mL glucose 65 g/L	4 mL urée 25 g/L	10 mL urée 25 g/L
		10 mL a. glucuronique 2 g/L		
		3,4 mL urée 25 g/L		
		10 mL glucosamine hydrochloride 33g/L		
	Compléter le volume de chaque solution à 500 mL			

Les solutions inorganiques et organiques sont mélangées et conservées à 4°C.

B- Ajouts aux solutions la journée même des digestions simulées.

Pour 1L de solutions mélangées*	Salive	Solution gastrique	Solution duodénale	Bile
	15 mg acide urique	3 g mucine	9 mL CaCl ₂ ·2H ₂ O 22,2 g/L	10 mL CaCl ₂ ·2H ₂ O 22,2 g/L
	25 mg mucine			1,8g BSA
				30 g bile
Ajustement du pH	6,8 ± 0,2	1,30 ± 0,02	8,1 ± 0,2	8,2 ± 0,2

*Les quantités varient en fonction du nombre de digestions planifiées au cours de la journée.

C- Ajout des enzymes et de la BSA au moment des digestions. (Quantités exprimées pour 1L de solution)

Salive	Solution gastrique	Solution duodénale
290 mg α-amylase	1 g BSA	1g BSA
	2,5 g pepsine	9 g pancréatine
		1,5 g lipase

(Versantvoort, Oomen et al. 2005)

Les enzymes sont pesées à l'avance dans des tubes eppendorf en fonction du nombre de digestions faites au cours d'une demi-journée et conservées sur la glace. Au moment de la digestion, elles sont ajoutées à des tubes coniques de 15 mL contenant les différentes solutions de digestion de sorte qu'un mL de ces solutions fournisse la quantité d'enzymes nécessaire pour la digestion d'un échantillon. Ces tubes sont mélangés par vortex pour être ensuite gardés sur la glace. Pour l'étape duodénale, la lipase et la pancréatine sont solubilisées dans des tubes distincts. Aussi, la BSA a été préalablement pesée et solubilisée dans les tubes destinés aux solutions gastrique et duodénale.

Déroulement de la digestion in vitro.

Afin de permettre les prélèvements pour les mesures en rhéologie, plusieurs échantillons d'une même solution sont digérés en parallèle. Un échantillon de 9 g est pesé dans un tube conique de 50 mL. Les béchers contenant les solutions de digestion et les tubes d'échantillon sont mis à tempérer dans un bain agitateur maintenu à 37°C. Avec un certain décalage, 5 mL de salive sans enzyme et 1 mL de salive contenant l' α -amylase sont ajoutés dans trois tubes d'échantillon qui sont ensuite agités par inversion et remis dans le bain. Après 2 minutes, un tube est utilisé pour mesurer la viscosité avec le rhéomètre Arès, alors que sont ajoutées aux deux autres les solutions gastriques (11 mL sans enzyme, 1 mL avec pepsine). Les tubes sont agités par inversion puis remis dans le bain pour 30 minutes, avec une nouvelle agitation au bout de 15 minutes. L'un des tubes est utilisé pour la rhéologie et l'autre reçoit les solutions duodénales (10 mL sans enzyme, 1 mL avec pancréatine, 1 mL avec lipase), 6 mL de bile et 2 mL de HCO_3^- . Ce tube est conservé dans le bain pour une heure, avec une agitation aux 20 minutes.

Les mesures de viscosité se font à 37°C dès la fin de chaque étape de digestion et aucun traitement visant à arrêter l'activité des enzymes n'est donné. Avant le prélèvement, les mixtures obtenues sont mélangées par vortex.

Annexe 2 : Valeurs de probabilité pour les effets de concentration de protéines (3,5% et 4%) et de formulation (PS 0%, C 0,7%, X 0,7% ou X+C 0,7%) sur les solutions fermentées.

Facteurs	Avant digestion						Étape buccale					
	k		n		Viscosité à 30 s ⁻¹		k		n		Viscosité à 30 s ⁻¹	
	Pr >F	F	Pr >F	F	Pr >F	F	Pr >F	F	Pr >F	F	Pr >F	F
Concentration en protéines (Pr)	0,0865	3,82	0,7012	0,16	0,0140	9,79	0,7279	0,13	0,1068	3,30	0,3552	0,96
Formulation (PS)	< 0,0001	166,13	< 0,0001	255,61	< 0,0001	380,23	< 0,0001	164,95	< 0,0001	1310,3	< 0,0001	185,24
Pr x PS	0,0461	4,21	0,1112	2,76	0,0213	5,76	0,0506	4,05	0,0013	14,51	0,2856	0,2856
Facteurs	Étape gastrique						Étape intestinale					
	k		n		Viscosité à 30 s ⁻¹		k		n		Viscosité à 30 s ⁻¹	
	Pr >F	F	Pr >F	F	Pr >F	F	Pr >F	F	Pr >F	F	Pr >F	F
Concentration en protéines (Pr)	0,9427	0,01	0,9566	0,00	0,1399	2,69	0,0398	6,01	0,0805	4,00	0,0905	3,70
Formulation (PS)	< 0,0001	71,00	0,0014	14,45	< 0,0001	47,37	< 0,0001	2953,48	< 0,0001	274,88	< 0,0001	5505,32
Pr x PS	0,2778	1,54	0,8679	0,24	0,4240	1,04	0,3071	1,42	0,4079	1,09	0,0432	4,33