

Table des matières

Résumé	iii
Abstract.....	iv
Table des matières	v
Liste des tableaux.....	viii
Liste des figures.....	ix
Liste des abréviations	x
Remerciements.....	xi
Avant-propos	xiii
Introduction générale	- 1 -
Chapitre 1. Revue de la littérature	- 5 -
1.1. L'état de la consommation du sodium au Canada	- 5 -
1.1.1. Impacts de la surconsommation du sodium.....	- 5 -
1.1.2. Effets bénéfiques de la réduction de la consommation du sodium.....	- 6 -
1.1.3. Cibles de réduction du sodium dans les aliments transformés	- 7 -
1.1.4. Rôles du NaCl dans les fromages.....	- 7 -
1.2. La réduction du sodium dans les fromages.....	- 8 -
1.2.1. Réduction du sodium par la substitution avec d'autres sels	- 9 -
1.3. Les fromages à pâte molle à croûte fleurie	- 12 -
1.3.1. Production de fromages à pâte molle au Québec	- 12 -
1.3.2. Fabrication d'un fromage à pâte molle à croûte fleurie.....	- 12 -
1.3.3. Fromages à pâte molle à croûte fleurie commerciaux.....	- 16 -
1.4. Les impacts de la matrice fromagère sur la bioaccessibilité des protéines	- 18 -
1.4.1. Bioactivité des protéines lactiques	- 18 -
1.4.2. Digestion des protéines.....	- 18 -
1.4.3. Impact de la texture du fromage sur la libération des protéines pendant la digestion ..	- 19 -
1.4.4. Modèles de digestion <i>in vitro</i>	- 26 -
Mise en contexte, hypothèse et objectifs	- 29 -
Chapitre 2. Effet de la réduction en sodium et de sa substitution sur la texture d'un fromage à pâte molle à croûte fleurie.....	- 31 -
2.1. Résumé	- 32 -

2.2. Abstract.....	- 33 -
2.3. Introduction	- 34 -
2.4. Matériel & Méthodes	- 37 -
2.4.1. Fabrication des fromages.....	- 37 -
2.4.2. Composition des fromages	- 40 -
2.4.3. Degré de protéolyse.....	- 41 -
2.4.4. Analyse du profil textural.....	- 42 -
2.4.5. Analyses statistiques.....	- 43 -
2.5. Résultats et discussion	- 43 -
2.5.1. Analyses physico-chimiques des fromages	- 43 -
2.5.2. Impact de l'affinage sur le degré de protéolyse et la texture des fromages.....	- 46 -
2.5.4. Impacts de la réduction en sodium sur la santé des consommateurs	- 57 -
2.6. Conclusion	- 59 -
Chapitre 3. Effet de la réduction en sodium sur la bioaccessibilité des protéines d'un fromage à pâte molle à croûte fleurie lors d'une digestion <i>in vitro</i> simulée	- 61 -
3.1. Résumé	- 62 -
3.2. Abstract.....	- 63 -
3.3. Introduction	- 64 -
3.4. Matériel & Méthodes	- 67 -
3.4.1. Fromages étudiés	- 67 -
3.4.2. Caractérisation des fromages	- 67 -
3.4.3. Digestion <i>in vitro</i> des fromages.....	- 69 -
3.4.4. Comportement des fromages à la digestion.....	- 72 -
3.4.5. Analyses statistiques.....	- 74 -
3.5. Résultats et discussion	- 74 -
3.5.1. Caractérisation des fromages	- 74 -
3.5.2. Comportement des fromages à la digestion <i>in vitro</i>	- 76 -
3.6. Conclusion	- 84 -
Conclusion générale et perspectives	- 85 -
Effet de la réduction en sodium sur les propriétés physico-chimiques du fromage Brie industriel de type stabilisé	- 85 -

Effet de la réduction en sodium sur la bioaccessibilité des protéines du fromage Brie industriel de type stabilisé pendant la digestion <i>in vitro</i>	- 86 -
Bibliographie	- 88 -
Annexes du Chapitre 2.	- 97 -
A2-1. Composition des fromages sur poids sec.....	- 97 -
A2-2. Teneurs en azote des fromages Brie expérimentaux	- 98 -
A2-3. Analyse du profil textural des fromages Brie expérimentaux pendant l'affinage	- 100 -
A2-4. Corrélations entre le degré de protéolyse et les paramètres de texture des fromages Brie expérimentaux pendant l'affinage	- 101 -
Annexes du Chapitre 3.	- 102 -
A3-1. Broyage du fromage Brie pour la digestion <i>in vitro</i>	- 102 -
A3-2. Recettes des jus digestifs utilisés pour la digestion <i>in vitro</i> des fromages Brie expérimentaux- 103 -	
A3-3. Paramètres de la digestion <i>in vitro</i> des fromages Brie expérimentaux.....	- 104 -
A3-4. Programmation pour contrôler le pH durant la digestion <i>in vitro</i>	- 105 -

Liste des tableaux

Tableau 1-1. Termes, définitions et calculs des paramètres de texture pour un aliment semi-solide comme le fromage Brie. ¹	- 22 -
Tableau 2-1. Conditions de saumurage des fromages Brie expérimentaux. ¹	- 38 -
Tableau 2-2. Composition et paramètres physico-chimiques du fromage Brie commercial (J25) et des fromages Brie expérimentaux (J28 ± 2).	- 45 -
Tableau 2-3. Valeurs de probabilité (p) de l'effet des variables étudiées (réduction en Na et temps d'affinage) sur les paramètres de texture des fromages Brie expérimentaux.	- 54 -
Tableau 2-4. Composition sur poids sec des fromages Brie expérimentaux à J28.	- 97 -
Tableau 2-5. Contenu en azote total (NT) des fromages Brie expérimentaux pendant l'affinage. ...	- 98 -
Tableau 2-6. Contenu en azote soluble dans l'eau (NSE) des fromages Brie expérimentaux pendant l'affinage.....	- 99 -
Tableau 2-7. Contenu en azote soluble dans le TCA des fromages Brie expérimentaux pendant l'affinage.	- 99 -
Tableau 2-8. Fermeté, cohésion, capacité gommante, résilience et adhésion des fromages Brie expérimentaux pendant l'affinage.	- 100 -
Tableau 2-9. Corrélations (valeur de probabilité) entre le degré de protéolyse et la texture pendant l'affinage.....	- 101 -
Tableau 3-1. Caractéristiques texturales des fromages Brie expérimentaux à J28.	- 75 -
Tableau 3-2. Composition et concentration finale des constituants des jus digestifs utilisés pour la digestion <i>in vitro</i> des fromages Brie expérimentaux ¹	- 103 -
Tableau 3-3. Paramètres utilisés pendant la digestion <i>in vitro</i> des fromages Brie expérimentaux dans pour chaque étape de digestion étudiée ^{1,2}	- 104 -
Tableau 3-4. Programmation du titrateur « <i>Mettler Toledo T90 Titration Excellence 4.00</i> » (Schwerzenbach, Suisse) pour contrôler le pH durant les étapes gastrique et duodénale de la digestion <i>in vitro</i> des fromages Brie expérimentaux.	- 105 -
Tableau 3-5. Programmation du titrateur « <i>Mettler Toledo T90 Titration Excellence 4.00</i> » (Schwerzenbach, Suisse) pour contrôler le pH durant l'étape duodénale (120-180 minutes) de la digestion <i>in vitro</i> des fromages Brie expérimentaux.	- 109 -
Tableau 3-6. Programmation du titrateur « <i>Mettler Toledo T90 Titration Excellence 4.00</i> » (Schwerzenbach, Suisse) pour ajuster le pH à 7,00 ± 0,05 à la fin de digestion <i>in vitro</i> des fromages Brie expérimentaux.....	- 110 -

Liste des figures

Figure 1-1. Phénomènes physico-chimiques se déroulant pendant l'affinage d'un fromage de type Camembert. ¹	- 15 -
Figure 1-2. Schéma des calculs effectués par le logiciel « <i>Texture Exposit Software</i> » des paramètres de l'analyse du profil textural des fromages Brie expérimentaux.....	- 21 -
Figure 2-1. Représentation schématique des temps d'analyse des fromages Brie expérimentaux pendant l'affinage.	- 40 -
Figure 2-2. Préparation des cylindres de fromage Brie pour l'analyse du profil textural.....	- 43 -
Figure 2-3. Pourcentage en Na (%) du fromage Brie expérimental CTL en comparaison avec les fromages Brie expérimentaux R et S (J28).....	- 46 -
Figure 2-4. Degré de protéolyse (NSE/NT et NSTCA/NT) des fromages Brie expérimentaux pendant l'affinage.	- 48 -
Figure 2-5. Texture des fromages Brie expérimentaux pendant l'affinage.	- 55 -
Figure 3-1. Schéma des échantillons de digestion <i>in vitro</i> des fromages Brie expérimentaux. ¹	- 71 -
Figure 3-2. Mesures de viscosité et de pH durant la digestion <i>in vitro</i> gastrique et duodénale d'un fromage Brie CTL expérimental à J28.	- 77 -
Figure 3-3. Bilan de masse de la phase liquide (surnageant), de la phase lipidique (matière grasse) et de la phase solide (culot) des fromages Brie expérimentaux pendant la digestion <i>in vitro</i>	- 80 -
Figure 3-4. Désintégration (A) et libération des protéines (B) des fromages Brie expérimentaux pendant la digestion <i>in vitro</i>	- 81 -
Figure 3-5. Profil protéique des surnageants des fromages Brie expérimentaux CTL, R et S aux étapes de digestion <i>in vitro</i> orale (O2), gastrique (G30, G60, G120) et duodénale (D60).	- 83 -

Liste des abréviations

AMT	Apport maximal tolérable
CTL	Contrôle (fromage contrôle à condition saline standard)
J	Jour
HCl	Acide chlorhydrique
MCV	Maladies cardiovasculaires
Na	Sodium
NaCl	Chlorure de sodium
NaOH	Hydroxyde de sodium
NS pH 4,6	Fraction azotée soluble à pH 4,6
NSE	Fraction azotée soluble dans l'eau
NSTCA	Fraction azotée soluble dans l'acide trichloroacétique
NT	Azote total
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
R	Réduit (fromage réduit en sodium par réduction nette)
S	Substitué (fromage réduit en sodium par substitution au KCl)
SCDA	Système de Classification de la Désintégration des Aliments (ou en anglais « <i>Food Breakdown Classification System</i> » (FBCS))
TCA	Acide trichloroacétique
TIM	« <i>TNO intestinal model</i> »
TPA	« <i>Texture profile analysis</i> »
WHO	« <i>World Health Organization</i> »

Remerciements

J'aimerais tout d'abord remercier Dre Sylvie Turgeon et Dr Steve Labrie, d'avoir vu mon potentiel dès nos premières conversations afin de collaborer ensemble. Vous savez transmettre votre savoir de façon passionnée et vos conseils sont toujours pertinents. Toujours disponibles pour vos étudiants, il a été facile de communiquer avec vous tout au long du processus. Cette accessibilité est rassurante lorsqu'on se fait attribuer pour la première fois un projet de cette ampleur.

Je tiens aussi à remercier Dre Laurie-Eve Rioux dont le soutien constant et la motivation contagieuse ont été grandement appréciés. Ta méthode de travail méticuleuse permet aux étudiants que tu supervises d'évoluer et de devenir des scientifiques qui se questionnent.

Je veux souligner le travail de soutien technique de Madame Diane Gagnon et de Madame Marilynne Touchette qui m'a permis de bien m'adapter à mon nouvel environnement de travail et aux nouvelles techniques de laboratoire. Je souhaite aussi remercier l'entreprise qui m'a accueillie pour la fabrication des fromages Brie.

L'entraide toujours présente apportée par mes collègues de travail dans les réunions des équipes de Dre Sylvie Turgeon et Dr Steve Labrie rend le milieu de travail stimulant. Vos commentaires et vos questionnements m'ont permis d'améliorer le contenu de mes présentations ainsi que d'améliorer ma capacité à communiquer de manière scientifique.

Je tiens à remercier profondément mon père et ma mère, Dominique et Marie, qui m'ont encouragée durant tout mon parcours d'études. Votre soutien et votre générosité ont grandement contribué à la réalisation de ce projet. Je veux aussi remercier mon conjoint, Mathieu, pour sa grande compréhension, sa patience et sa présence auprès de moi durant ce projet. Je tiens également à remercier ma sœur et mes frères, Catherine, Eric et Nicholas, pour leur soutien moral.

Ce projet a pu être mené à terme par la contribution financière de nombreux partenaires: le Fonds de Recherche du Québec sur la nature et les technologies (FRQNT), le Ministère du Développement économique, de l'innovation et de l'Exportation du Québec ainsi que le Ministère de l'Enseignement

Supérieur, de la Recherche, de la Science et de la Technologie. Je tiens à exprimer ma gratitude d'avoir été récipiendaire des bourses de maîtrise en recherche du FRQNT, de AGRO:INNO de la Fondation Initia et de la fondation François-Bourgeois ainsi que d'avoir participé au programme FAST de l'INAF (CRSNG).

Avant-propos

Ce mémoire est divisé en 7 sections: 1) l'introduction générale, 2) la revue de littérature, 3) l'hypothèse et les objectifs, 4) le chapitre 2 (article 1), 5) le chapitre 3 (article 2), 6) la bibliographie et 7) les annexes des chapitres 2 et 3. Toutes les sections du mémoire, excepté la bibliographie, sont écrites en français. La revue de littérature couvre les sujets suivants: l'état de la consommation du sodium au Canada, la réduction du sodium dans les fromages, les fromages à pâte molle à croûte fleurie, ainsi que et les impacts de la matrice fromagère sur la bioaccessibilité des protéines.

Le chapitre 2 (article 1) élabore sur l'impact de la réduction en sodium par réduction nette et par substitution partielle au chlorure de potassium sur la composition, le degré de protéolyse et la texture du fromage Brie en fonction du temps d'affinage. Les résultats du chapitre 2 ont été présentés sous forme d'affiche scientifique au colloque du Centre de recherche en sciences et technologie du lait (STELA) en 2015. Le chapitre 3 (article 2) documente l'impact de la réduction en sodium du fromage Brie par réduction nette et par substitution partielle au chlorure de potassium sur la désintégration du fromage, ainsi que la libération des protéines pendant la digestion en condition *in vitro* simulant la digestion humaine. Les articles 1 et 2 ne sont pas publiés au moment de déposer ce mémoire de maîtrise.

L'approche expérimentale, l'analyse des résultats ainsi que la rédaction ont été supervisées par Dre Sylvie Turgeon, Dr Steve Labrie et Dre Laurie-Eve Rioux. Les expérimentations en laboratoire nécessaires pour mener à terme les chapitres 2 et 3 ont été réalisées par moi-même. Les méthodes utilisées pour la réduction en sodium du fromage Brie ont été effectuées selon les travaux antérieurs de Madame Marilyne Touchette dans le cadre de sa maîtrise avec mémoire. La digestion *in vitro* a été effectuée selon les travaux de l'équipe de Dre Sylvie Turgeon. J'ai optimisé le modèle de digestion *in vitro* en élaborant une méthode de contrôle du pH en continu pendant la digestion du fromage Brie. Toutes les références citées dans ce mémoire sont listées dans la bibliographie.

Introduction générale

L'Organisation Mondiale de la Santé a établi, en 2003, un objectif de consommation mondiale du sodium (Na) à moins de 2,0 g par jour (ce qui équivaut à moins de 5,0 g par jour de chlorure de sodium (NaCl)) (World Health Organization & Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2003). De même, l'« *Institute of Medicine* » (2005) a établi un apport maximal tolérable de 2,3 g de Na par jour. Or, il est estimé que les Canadiens ont un apport moyen de 3,1 g de sodium par jour (Fischer et al., 2009): ceci signifie qu'environ 85 % des Canadiens dépassent l'apport maximal tolérable en sodium chaque jour (Health Canada, 2010).

La consommation excessive du sodium est reconnue mondialement comme étant liée à l'incidence de l'hypertension artérielle et des problèmes cardiovasculaires (Gouvernement of Canada, 2013; Health Canada, 2010; Kaplan, 2000; O'Shaughnessy & Karet, 2004; Salahdeen & Alada, 2007; Strazzullo et al., 2009). En 2009, plus de 20 % des décès ont été causés par les maladies cardiovasculaires (MCV) les classant comme la deuxième cause de mortalité au Canada (Statistics Canada, 2013). La pression artérielle élevée augmente les risques d'autres MCV comme les accidents vasculaires cérébraux, les crises cardiaques, l'insuffisance cardiaque (Cook et al., 2007; Tuomilehto et al., 2001), ainsi que les risques de maladies rénales (Heeg et al., 1989; Swift et al., 2005). De plus en plus de personnes risquent de souffrir d'hypertension et des maladies en découlant si aucune mesure de prévention n'est prise en raison de la population vieillissante, des mauvaises habitudes alimentaires, de la sédentarité et de l'obésité (Kearney et al., 2005). En 2000, les MCV ont engendré des coûts de près de 22,2 milliards de dollars au Canada dont plus de 10 % sont attribués à la gestion de l'hypertension (Public Health Agency of Canada, 2009). Les MCV ont été associées à plus de 15 % des hospitalisations en 2005 (Public Health Agency of Canada, 2009).

Une des recommandations pour diminuer l'hypertension artérielle est de réduire la consommation de sodium. En effet, les études ont démontré que réduire sa consommation de sodium de 1,84 g de sodium par jour (par exemple, passer de 3,50 g à 1,66 g de sodium consommé par jour) diminuerait la pression artérielle (He & MacGregor, 2008), l'ostéoporose (Devine et al., 1995) et les risques du cancer de l'estomac (Joossens et al., 1996). D'autres bénéfices de la réduction de la consommation en sodium ont été estimés comme la diminution de 30 % de la prévalence à l'hypertension (Joffres et

al., 2007), de 8,6 % des incidents cardiovasculaires (Penz et al., 2008), ainsi qu'une économie de 430 à 540 millions de dollars pour les coûts engendrés par les MCV (Joffres et al., 2007).

En 2012, Santé Canada a proposé des cibles volontaires de réduction du sodium dans les produits alimentaires transformés (Health Canada, 2012). Plus de 75 % du sodium consommé provient des aliments transformés (Gouvernement of Canada, 2013) et 88 % de leur teneur finale en sodium est causé par un ajout lors de la fabrication et de la préparation (Mattes & Donnelly, 1991). Les fromages se classent au sixième rang en apportant 5 % du sodium dans l'alimentation des Canadiens, après les produits de boulangerie, les viandes transformées, les légumes transformés, les soupes et les plats de pâtes (14 %, 9 %, 7 %, 7 % et 6 %, respectivement) (Fischer et al., 2009). Presque toutes les variétés de fromage ont été ciblées par la réduction en sodium, notamment des fromages populaires comme le Cheddar et le Mozzarella, mais aussi des fromages de spécialités à pâte molle à croûte fleurie comme le Brie et le Camembert (Health Canada, 2012). Réduire le sodium dans les fromages n'est pas une solution sans conséquence puisque le NaCl joue de nombreux rôles, tant au niveau microbiologique, technologique qu'organoleptique. Différentes méthodes ont été étudiées afin de réduire le sodium dans les fromages, les plus populaires étant la réduction nette de la quantité de sodium ainsi que la substitution partielle du sodium par un autre sel. La littérature actuelle rapporte les effets de la réduction du sodium dans les fromages sur l'activité de l'eau, la viabilité de la microflore, la protéolyse, la lipolyse, l'acidité ainsi que les qualités organoleptiques comme le goût, la texture en bouche, les saveurs et l'appréciation globale des consommateurs. Plusieurs études de différentes variétés de fromage ont démontré qu'il est possible de substituer une partie du sodium par du potassium provenant du chlorure de potassium (KCl), sans affecter les caractéristiques du produit final telles que la composition totale, la protéolyse et la texture (IDF, 2014). Cependant, peu d'études s'attardent sur les effets de la réduction en sodium dans les fromages de spécialité comme les fromages à pâte molle à croûte fleurie tels que le Brie et le Camembert. Les fromages à pâte molle à croûte fleurie gagnent en popularité auprès des consommateurs québécois depuis les dernières années. Ceux-ci dépensent davantage pour les fromages comparativement au reste des provinces du Canada (4,76 vs 3,89 \$) (Statistics Canada, 2001). En 2012, 17,9 % de la production totale de fromages au Canada était des fromages à pâte molle, ce qui représente plus de 75 000 kg de fromages (Canadian Dairy Information Centre, 2013a). Près de la moitié de la production de fromage de spécialité s'est effectuée au Québec en 2012, avec 43,3 % de la production comparativement à

36,0 % en Ontario et 19,7 % pour les autres provinces du Canada (Canadian Dairy Information Centre, 2013b). À cause de la popularité croissante des fromages à pâte molle à croûte fleurie au Canada et particulièrement au Québec, il est nécessaire d'étudier les impacts de la réduction en sodium dans ce type de fromage afin de pouvoir offrir des produits avec de meilleurs attributs santé. Le NaCl joue de nombreux rôles dans les fromages à pâte molle à croûte fleurie comme le Camembert: le sel module la microflore du fromage pendant et après sa fabrication et pendant l'affinage, affectant la texture, la croûte et les qualités organoleptiques du fromage et aussi complémente l'égouttage du lactosérum, affectant l'humidité finale du fromage.

La composition des aliments en nutriments est actuellement la méthode d'évaluation nutritionnelle, basée sur l'hypothèse que les composantes d'un aliment sont toutes absorbées par l'organisme et en ne prenant pas en compte l'effet de la matrice (Turgeon & Rioux, 2011). La compréhension fondamentale du comportement de la libération progressive des nutriments à partir de différentes matrices alimentaires est un sujet qui peut avoir plusieurs applications. Ainsi, ce concept intervient dans des études récentes s'intéressant au développement de nouveaux aliments fonctionnels (Doleyres & Lacroix, 2005), ainsi qu'à l'amélioration des produits déjà existants (Lairon et al., 2007; Lamothe et al., 2012). D'autres études se penchent sur l'évaluation des risques alimentaires associés à la libération de toxines (Versantvoort et al., 2005) et aux allergènes (Franck et al., 2002) en considérant que l'assimilation des molécules bioactives des aliments dépend de leur bioaccessibilité et leur biodisponibilité dans l'organisme (Turgeon & Rioux, 2011). Il est de plus en plus évident que la matrice alimentaire a un effet régulateur sur la désintégration de l'aliment (Parada & Aguilera, 2007; Sensoy, 2014; Singh et al., 2015) ainsi que sur la cinétique de libération et d'absorption des nutriments (Aguilera, 2005; Norton et al., 2007; Turgeon & Rioux, 2011). Les travaux de Lamothe et coll. (2012) sur la digestion en conditions *in vitro* des fromages Mozzarella, Cheddar doux, Cheddar vieilli et Cheddar faible en matières grasses ont démontré que plus un fromage est friable, moins élastique et moins cohésif, plus rapidement il se désintègrera au début de la digestion gastrique. Une autre étude sur la digestion *in vitro* (avec des conditions similaires aux travaux de Lamothe et coll. (2012)) du fromage Cheddar a démontré que l'enrichissement en calcium du fromage a augmenté sa fermeté ainsi que le temps de désintégration pendant la digestion gastrique. La vitesse de désintégration d'une matrice alimentaire influence la bioaccessibilité des nutriments comme les protéines et influence donc aussi la biodisponibilité de celles-ci.

Barbé et coll. (2013) ont étudié l'impact d'un traitement technologique (traitement de chaleur du lait ou non) ainsi que l'effet de la structure de l'aliment (gélification du lait ou non) sur la cinétique de digestion et d'absorption des protéines du lait liquide et gélifié chez le mini-porc. Le traitement de chaleur augmentait la sensibilité de la β -lactoglobuline à l'hydrolyse pendant la digestion gastrique. Celle-ci est une protéine globulaire résistante à la pepsine (Barbé et al., 2013). Le changement de structure de l'aliment à l'étude, de l'état liquide à l'état solide (gel), a ralenti l'apparition des acides aminés dans le plasma sanguin. Cette dernière étude confirme que la structure d'un aliment peut influencer la vitesse de libération et d'absorption des protéines et que l'application d'un traitement technologique peut affecter son comportement à la digestion.

En sachant que la texture du fromage Brie pourrait être affectée par la réduction en sodium et qu'un traitement technologique, comme par exemple ici le salage, peut affecter le comportement d'un aliment pendant la digestion, il est pertinent d'évaluer l'impact de la réduction en sodium sur la désintégration du fromage Brie et la cinétique de libération des protéines pendant la digestion *in vitro*.

Chapitre 1. Revue de la littérature

1.1. L'état de la consommation du sodium au Canada

En 2003, l'Organisation Mondiale de la Santé a établi un objectif de consommation mondiale du sel à 5 g de NaCl (chlorure de sodium) par jour (World Health Organization & Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2003). Actuellement, l'apport moyen en sodium chez les Canadiens est estimé à 3136 mg de sodium (Na) par jour (Fischer et al., 2009). Or, l'apport maximal tolérable a été établi à 2300 mg de sodium par jour par l'« *Institute of Medicine* » (Institute of Medicine of the National Academy of Sciences, 2005). Les études indiquent que l'apport maximal tolérable est ainsi dépassé chaque jour par environ 85 % des hommes et par entre 63 % à 85 % des femmes (Health Canada, 2010).

1.1.1. Impacts de la surconsommation du sodium

Le sodium ingéré en surplus est difficilement excrété par les reins, ce qui engendre une élévation de la pression artérielle (He & MacGregor, 2007; Intersalt Cooperative Research Group, 1988; Meneton et al., 2005). L'hypertension causée par la surconsommation du sodium a été démontrée chez des chimpanzés (Denton et al., 1995; Elliott et al., 2007). Différentes études épidémiologiques ont également démontré que les personnes habitant des régions ayant facilement accès à du NaCl présentaient une pression artérielle généralement plus élevée que celles n'ayant pas accès à du NaCl (He & MacGregor, 2008). La surconsommation du sodium est considérée mondialement comme étant liée à l'incidence de l'hypertension artérielle et des problèmes cardiovasculaires (Gouvernement of Canada, 2013; Health Canada, 2010; Kaplan, 2000; O'Shaughnessy & Karet, 2004; Salahdeen & Alada, 2007; Strazzullo et al., 2009). D'autres complications de santé telles que le diabète, le cancer de l'estomac (Joossens et al., 1996; Tsugane et al., 2004), les pierres aux reins (Cappuccio et al., 2000) et l'ostéoporose (Cappuccio et al., 2000) sont aussi reliées à la surconsommation du sodium (Sultanpur et al., 2011). L'hypertension est un facteur de risque évitable des maladies du cœur (World Health Organization, 2013).

Au Canada, la deuxième cause de mortalité correspond aux maladies cardiovasculaires (Statistics Canada, 2013). Elles sont responsables de plus de 20 % des décès au Canada en 2009 (Statistics Canada, 2013). Les risques de maladies cardiovasculaires, comme les accidents vasculaires cérébraux, les crises cardiaques, l'insuffisance cardiaque (Cook et al., 2007; Tuomilehto et al., 2001) et les risques de maladies rénales (Heeg et al., 1989; Swift et al., 2005) sont accrus lorsque la pression artérielle est élevée. À moins que des mesures préventives soient prises, la prévalence de l'hypertension et le nombre de décès en découlant tendent à augmenter en raison de la population vieillissante, des mauvaises habitudes alimentaires, de la sédentarité et de l'obésité (Kearney et al., 2005). Plus de 15 % des hospitalisations en 2005 sont associées aux maladies cardiovasculaires (Public Health Agency of Canada, 2009). En 2000, les coûts engendrés par les maladies cardiovasculaires ont été estimés à 22,2 milliards de dollars, soit 7,6 milliards de dollars en coûts directs (soins hospitaliers et médicaux, médicaments d'ordonnance, professionnels de la santé) et 14,6 milliards de dollars en coûts indirects (production économique perdue suite à une incapacité de travailler ou décès prématuré) (Public Health Agency of Canada, 2009). Il a été estimé en 2000 que des dépenses globales de 2,29 milliards de dollars par année doivent être attribuées à la gestion de l'hypertension (Public Health Agency of Canada, 2009).

1.1.2. Effets bénéfiques de la réduction de la consommation du sodium

La réduction de la consommation du sodium de 3500 mg à 1660 mg par jour (une réduction de 1840 mg par jour) aurait plusieurs bénéfices santé comme la diminution de la pression artérielle (He & MacGregor, 2008), de l'ostéoporose (Devine et al., 1995) et du cancer de l'estomac (Joossens et al., 1996). Il est estimé notamment qu'il y aurait une diminution de 30 % au niveau de la prévalence de l'hypertension (plus d'un million de personnes qui ne seraient plus touchées par l'hypertension) (Joffres et al., 2007), une diminution de 8,6 % des incidents cardiovasculaires (Penz et al., 2008), une diminution de 6,5 % des visites chez les professionnels de santé, ainsi qu'une économie de 18 % à 23 % des dépenses (430 à 540 millions de dollars) pour les frais incluant les médicaments, les visites aux professionnels de santé et les tests effectués en laboratoire (Joffres et al., 2007).

1.1.3. Cibles de réduction du sodium dans les aliments transformés

Des cibles de réduction volontaires du sodium dans de nombreux produits alimentaires transformés ont été suggérées par Santé Canada (2012). Les aliments transformés apporteraient plus de 75 % du sodium consommé (Gouvernement of Canada, 2013). C'est pendant la fabrication et la préparation des aliments que 88 % du contenu en sodium est ajouté. Seulement 12 % du sodium correspond à la quantité naturellement présente dans les aliments (Mattes & Donnelly, 1991). Les produits de boulangerie, les viandes transformées, les légumes transformés, les soupes, les plats de pâtes et les fromages sont les six sources principales qui apportent quotidiennement du sodium avec des proportions respectives de 14 %, 9 %, 7 %, 7 %, 6 % et 5 % (Fischer et al., 2009). De nombreuses variétés de fromages ont été ciblées par Santé Canada en ce qui concerne la réduction du sodium, telles que le fromage Cottage, le fromage à la crème, les fromages fondus, le Brie, le Camembert, le Cheddar, le Suisse, le Monterey Jack, le Brick, le Colby, le Gouda, le Mozzarella, le Parmesan et le Feta (Health Canada, 2012). Le fromage est un aliment intéressant non seulement par la grande variété de fromages disponibles, mais particulièrement pour sa grande qualité nutritive (protéines, minéraux, gras et vitamines) (Institut Fromages et Santé, 2012; O'Brien & O'Connor, 2004). La réduction du sodium dans les fromages est complexe, car il faut considérer les nombreux rôles du NaCl. Ceux-ci seront discutés dans les sections suivantes.

1.1.4. Rôles du NaCl dans les fromages

La fabrication des fromages comporte plusieurs étapes contrôlées afin d'obtenir un produit final de qualité (Fox & McSweeney, 2004) incluant le salage par l'ajout de chlorure de sodium (NaCl). Le NaCl joue plusieurs rôles importants dans les fromages aux niveaux technologique, microbiologique et organoleptique (Guinee & Fox, 2004; Guinee & Sutherland, 2011). Le sel complète l'égouttage en diminuant le contenu en humidité (Mistry & Kasperson, 1998; Schroeder et al., 1988) en favorisant la sortie du lactosérum par la synérèse du caillé (Guinee & Fox, 2004). Les caractéristiques fonctionnelles de la matrice sont influencées par le NaCl (Floury et al., 2009) qui affecte l'hydratation (Gillis, 2004; Guinee & Sutherland, 2011; Kindstedt et al., 1992) et l'agrégation (Guinee & Fox, 2004) des caséines. Le sel aide à la conservation en prévenant la croissance de pathogènes et de microorganismes de détérioration avec son effet de diminution de l'activité de l'eau et d'augmentation

de la pression osmotique de la phase aqueuse (Aly & Galal, 2002; Gillis, 2004; Guinee & Fox, 2004). Le sel permet aussi de sélectionner et de réguler les populations microbiennes désirables (Gillis, 2004). Il influence les activités résiduelles des enzymes coagulantes, microbiennes et natives du lait (Gillis, 2004; Guinee & Fox, 2004). Au niveau organoleptique, en plus du goût salé, le sel contribue à procurer au fromage plusieurs de ses caractéristiques comme la couleur, la croûte formée, etc. (Gillis, 2004) et par sa contribution à la texture par ses effets sur les souches microbiennes impliquées dans chaque fromage. Le sel est aussi connu pour masquer et rehausser les arômes et les saveurs (Gillis, 2004).

1.2. La réduction du sodium dans les fromages

La prise de conscience de la problématique de consommation excessive du sodium, depuis les dernières années, a mené à la mise en place de stratégies de réduction du sodium dans les fromages afin de continuer d'offrir des produits sains, nutritifs et surtout appréciés par les consommateurs. L'importance du sel dans les fromages rend la tâche ardue pour les industries fromagères qui veulent réduire la teneur en sodium de leurs produits, puisque les répercussions sur la qualité des produits sont peu connues. La réduction du sodium dans divers fromages a été abordée par différentes études (Cruz et al., 2011; El-Bakry, 2012; IDF, 2014; Johnson et al., 2009). L'un des fromages les plus étudiés est le Cheddar, un fromage à pâte ferme non cuite dont le salage est effectué dans la masse, notamment à cause de sa popularité auprès des consommateurs. Des études ont démontré que contrôler plus précisément la teneur en sodium en diminuant la variabilité du salage (Agarwal et al., 2011), réduire simplement la teneur en sodium (Rulikowska et al., 2013) et réduire la teneur en sodium en conservant une humidité comparable au produit standard (Møller et al., 2013) ne suffisent pas pour réduire considérablement la teneur en sodium du fromage Cheddar. La substitution partielle du sodium a alors été étudiée dans différentes variétés de fromage avec diverses teneurs et divers sels de remplacement ($MgCl_2$, $CaCl_2$ ou KCl) (Aly, 1995; Ayyash et al., 2011; Demott et al., 1984; El-Bakry et al., 2011; Fitzgerald & Buckley, 1985; Karahadian & Lindsay, 1984; Katsiari et al., 1997, 1998; Kaur et al., 2011; Reddy & Marth, 1993, 1995). D'autres alternatives à la réduction en sodium pourraient aussi être envisagées comme les mélanges commerciaux de sels faibles en sodium (« *Pansalt* », « *Lo®salt* », « *Saxa So-low salt* » et « *Morton Lite Salt®* ») déjà disponibles sur le marché et ayant été utilisés dans des produits de viandes tels que le jambon, le

bacon et la dinde (Desmond, 2006). Des rehausseurs de saveurs ont aussi été étudiés dans le but de réduire le sodium dans les fromages (Karahadian & Lindsay, 1984) et afin de rétablir un bon goût aux fromages moins salés (Guinee & Fox, 2004). Les rehausseurs de saveurs sont nombreux et regroupent les extraits de levures, l'acide lactique, le glutamate monosodique et les nucléotides (Desmond, 2006). Bien que les mélanges de sels commerciaux et les rehausseurs de saveurs puissent être intéressants à utiliser dans les fromages, il faut d'abord évaluer les impacts de la réduction nette en sodium et de la substitution par des sels plus simple avant d'étudier des changements plus complexes.

1.2.1. Réduction du sodium par la substitution avec d'autres sels

Plusieurs études ont démontré la faisabilité d'utiliser d'autres sels en remplacement du NaCl dans les fromages. Fitzgerald et Buckley (1985) ont été parmi les premiers à démontrer la possibilité de réduire le sodium dans les fromages par substitution partielle et totale avec différents sels, tels que le CaCl₂, le MgCl₂ et le KCl. Les fromages substitués totalement par du CaCl₂, du MgCl₂ et du KCl ont présenté une forte amertume rendant leur goût inacceptable. Les fromages partiellement substitués avec du CaCl₂ et du MgCl₂ ont présenté des pointages inférieurs au fromage à teneur en NaCl standard en ce qui concerne les saveurs (goûts amers et métalliques) et la texture (floconneux, friable et gras) tel qu'évalué par un panel de dégustation. Bien que le fromage substitué partiellement avec du chlorure de potassium (KCl) ait présenté une valeur de pH plus élevée que tous les autres fromages, ce fromage a démontré des pointages similaires au fromage contrôle au niveau du goût. Cette dernière étude confirme que le KCl est un bon sel pour remplacer une partie du NaCl dans le fromage Cheddar. En effet, la similarité entre le NaCl et le KCl en fait un substitut potentiel dans le but de réduire le sodium (Kaur et al., 2011). Les sites de fixation du sodium et du potassium ainsi que leur affinité sont identiques au niveau des caséines (Le Graet & Brulé, 1993). De plus, la réduction de la pression artérielle et des risques cardiovasculaires du potassium est reconnue (Doyle & Glass, 2010; Institute of Medicine of the National Academy of Sciences, 2005). L'effet inhibiteur du KCl par la modulation de la pression osmotique sur les micro-organismes est similaire à celui du NaCl (Guinee & Fox, 2004).

D'autres travaux sur le fromage Cheddar, incluant huit conditions expérimentales de salage à différents niveaux et de substitution au KCl (sans sel ajouté, 2,3 % et 2,7 % de NaCl, 2,3 % KCl, 2,3 % de mélanges de NaCl et KCl dans les ratios massiques de 2:1, 1:1, 1:2, et 3:4), ont démontré que la protéolyse de tous les fromages a augmenté en fonction des temps d'affinage de 0 (à jour 3 précisément), 12, 24 et 36 semaines (Reddy & Marth, 1993), mais qu'il n'y avait aucune différence significative entre la teneur en azote soluble dans le TCA des fromages étudiés. Des pointages de « aucune » à « légère » amertume ont décrits les fromages à conditions salines standard et partiellement substitués au KCl. La microflore de ces mêmes fromages Cheddar réduits en sodium a aussi été étudiée (Reddy & Marth, 1995). Aucune différence n'a été observée entre les sept différents fromages expérimentaux salés au NaCl et/ou KCl pour les comptes des bactéries aérobies, des bactéries lactiques, des spores aérobies, des bactéries coliformes, des levures et des moisissures. L'absence de *Staphylococcus aureus* a été confirmée pour tous les fromages expérimentaux étudiés.

Plusieurs fromages ont montré des caractéristiques acceptables après une substitution partielle du sodium par le potassium allant jusqu'à 50 %, notamment dans le Cheddar (Fitzgerald & Buckley, 1985), les fromages fondus (El-Bakry et al., 2011; Karahadian & Lindsay, 1984), le Cottage (Demott et al., 1984), le Feta (Aly, 1995; Katsiari et al., 1997), le Kefalograviera (Katsiari et al., 1998) et le Halloumi (Ayyash et al., 2011).

Peu d'études documentent l'effet de la réduction en sodium des fromages à pâte molle à croûte fleurie comme les fromages Brie et Camembert. À ce jour, trois études sur le Camembert décrivent les effets de la réduction en sodium par la substitution partielle du sodium par du magnésium (Lesage et al., 1992; Lesage et al., 1993), par la réduction nette (sans substitution) ainsi que par la substitution partielle avec du potassium (Iwanczak et al., 1995).

Les travaux de Lesage et coll. (1992) décrivent les impacts de la réduction en sodium du fromage Camembert additionné en magnésium. Les fromages additionnés en magnésium et réduits en sodium ont une croûte plus épaisse et présentent un défaut de type « peau de crapaud » perceptible à J40 et J55. Les auteurs expliquent que l'ajout en magnésium et les teneurs en NaCl inférieures à 1 % auraient favorisé la croissance de la levure *Geotrichum candidum*. L'ajout de magnésium

procure aux fromages Camembert à teneur standard et réduite en NaCl un degré de protéolyse plus élevé que dans un Camembert standard, ainsi que des descriptifs sensoriels négatifs comme une croûte piquante, rance, amère et acide, ce qui est aussi le cas pour la pâte. Puisque le MgCl₂ était ajouté dans tous les fromages à différentes teneurs en NaCl, cette équipe a poursuivi les recherches avec une seconde étude sur les fromages contenant soit du NaCl, soit du MgCl₂ ou alors un mélange des deux sels, afin d'évaluer les conséquences sur la protéolyse et la lipolyse dans le fromage Camembert (Lesage et al., 1993). Le degré de protéolyse (ces auteurs utilisant le pourcentage de la teneur en azote soluble dans le TCA divisé par la teneur en azote total) des trois conditions salines étudiées a augmenté entre les jours 22 et 55. Le fromage uniquement salé au MgCl₂ a démontré un degré de protéolyse plus élevé à J22 ($12,0 \pm 1,1$ %) comparativement aux fromages salés avec la mixture MgCl₂/NaCl ($5,0 \pm 1,0$ %) et salés avec du NaCl ($5,8 \pm 0,9$ %). Ensuite à J40, les fromages uniquement salés au MgCl₂ ainsi que ceux salés par le mélange MgCl₂/NaCl, ont obtenu les plus grandes valeurs de protéolyse ($11,0 \pm 1,0$ % et $13,0 \pm 1,1$ %) comparativement au fromage salé au NaCl ($8,5 \pm 1,4$ %). Les mêmes observations ont été décrites pour les fromages à J55, avec un écart encore plus grand entre les fromages uniquement salés au MgCl₂ ($21,0 \pm 1,8$ %) et salés avec le mélange MgCl₂/NaCl ($26,0 \pm 2,4$ %), ainsi que le fromage salé au NaCl ($8,0 \pm 1,2$ %). Les auteurs ont conclu que la protéolyse dans le fromage Camembert a été stimulée par l'ajout du magnésium, bien que le NaCl ait ralenti son effet en début d'affinage.

La réduction en sodium et la substitution du sodium par le potassium ont été étudiées dans les fromages salés par saumurage (Camembert, Camping, Tilsit et Gouda) (Iwanczak et al., 1995). Les auteurs ont modifié le temps de saumurage du Camembert dans des saumures standard et substituées à 50 % (p/p) en KCl pour obtenir des fromages saumurés pendant 100 % (40 minutes), 75 % (30 minutes), 50 % (20 minutes) et 25 % (10 minutes) du temps standard de saumurage. Le contenu en sodium diminue lorsque le temps de saumurage est diminué. Le potassium serait plus rapidement absorbé dans le fromage que le sodium, cependant les auteurs n'ont pas émis d'hypothèse pour expliquer ce phénomène. Le degré de protéolyse a été un peu plus prononcé dans le fromage Camembert partiellement substitué en KCl, comparativement au Camembert standard. Les fromages ont été évalués par un panel de dégustation: les panelistes n'ont pas été en mesure de discerner les fromages standard et substitué en KCl. Les fromages partiellement substitués en KCl ont été décrits comme ayant un corps plus ferme comparativement au fromage standard, mais

présentant des saveurs et une croûte similaires au fromage standard. Les fromages préférés du panel de dégustation ont été les fromages dont le temps de saumurage a été réduit de 25 % à 50 %. Ces travaux démontrent qu'il est possible de réduire le sodium et même d'en substituer une partie par du KCl dans le Camembert sans affecter ses qualités organoleptiques. Cependant, les changements de texture au sein des fromages réduits en sodium par la substitution partielle au KCl n'ont pas été quantifiés.

1.3. Les fromages à pâte molle à croûte fleurie

1.3.1. Production de fromages à pâte molle au Québec

Au Québec, la popularité des fromages se traduit par une plus grande dépense hebdomadaire (4,76 \$) pour ces produits par les consommateurs comparativement au reste du Canada (région de l'Atlantique 2,93 \$, Ontario 3,96 \$, région des Prairies 4,27 \$ et Colombie-Britannique 4,38 \$) (Statistics Canada, 2001). Les fromages de spécialités comme les fromages à pâte molle à croûte fleurie connaissent une popularité croissante depuis les dernières années (Spinnler & Gripon, 2004). Plus de 75 000 kg de fromages à pâte molle a été produit au Canada en 2012, ce qui représente 17,9 % de la production totale de fromage (Canadian Dairy Information Centre, 2013a). En 2012, 43,3 % de la production de fromages de spécialité s'est faite au Québec, comparativement à 36,0 % en Ontario et 19,7 % pour les autres provinces du Canada (Canadian Dairy Information Centre, 2013b). L'engouement pour les fromages de spécialité, autant au niveau de l'offre et de la demande, justifie les efforts des producteurs de fromages de spécialité de vouloir offrir des produits de qualité répondant aux attentes des consommateurs.

1.3.2. Fabrication d'un fromage à pâte molle à croûte fleurie

La catégorie des fromages à pâte molle à croûte fleurie est représentée par les fromages Brie et Camembert. La littérature actuelle documente davantage le fromage Camembert à titre d'exemple de cette famille. Le Brie ressemble au Camembert au niveau de sa méthode de fabrication, d'affinage et de ses qualités organoleptiques. Le Brie aurait fait son apparition il y a environ 1000 ans, tandis que

le Camembert est plus jeune, seulement 200 ans (Desmasures, 2014). Les deux fromages viennent de la France, mais de terroirs différents. Le Brie traditionnel est sous forme de grosses meules de plusieurs kilos tandis que celles du Camembert sont habituellement plus petites, autour de 250 g. À l'extérieur de la France, les appellations Brie et Camembert sont utilisées de façon peu homogène et dans plusieurs cas, il est difficile de déterminer les caractéristiques qui amènent les fromagers à utiliser l'une plus que l'autre. C'est pourquoi les phénomènes observés dans les deux variétés peuvent être souvent généralisés à l'ensemble des fromages de la variété des fromages à croûte fleurie.

La fabrication du fromage Brie est très similaire à celle du Camembert et se fait en neuf étapes: préparation du lait, maturation du lait, emprésurage, caillage, coupage, moulage, égouttage, salage et affinage.

Le lait utilisé en fabrication fromagère est standardisé au niveau du contenu en protéines et en matière grasse (Fox & McSweeney, 2004). Les ferments de départ, composés d'une microflore bactérienne et fongique, sont ajoutés au lait pasteurisé. Lorsque le lait a atteint un pH autour de 6,4 lors de la période de maturation, la coagulation du lait est enclenchée par l'ajout de la présure. Pour que le lait coagule, les caséines doivent être déstabilisées pour en venir à interagir ensemble pour former un réseau de protéines qui entraine la phase aqueuse et la matière grasse (Johnson & Law, 2010). En pratique, le pH du lait doit atteindre un intervalle entre 5,1 et 4,6 pour coaguler (Fox & McSweeney, 2004). Dans le lait, les caséines sont sous forme de micelles qui sont en fait des agrégats de caséines α_s , β et κ stabilisés par du phosphate de calcium colloïdal. L'agencement des caséines en micelles et la description des caséines sont élaborés dans la revue de littérature de (Dalglish & Corredig, 2012). La κ -caséine se situe à la surface des micelles et possède un macropeptide hydrophile qui permet la dispersion des micelles dans le lait par des répulsions stériques. Lorsque ce macropeptide est clivé par la présure, les micelles de caséines peuvent se rapprocher et interagir ensemble, ce qui cause éventuellement la coagulation du lait. Simultanément, l'acidification du lait par les bactéries lactiques diminue les charges des κ -caséines ainsi que la répulsion stérique entre les micelles (de Kruif, 1999). Des interactions hydrophobes permettent la liaison des micelles déstabilisées avec l'aide du calcium ionique (Bringe & Kinsella, 1986). L'acidification se poursuit dans le caillé pendant l'égouttage et solubilise partiellement le phosphate

de calcium colloïdal, affaiblissant la structure du réseau protéique (Lucey et al., 2003). Le nombre et la force des liaisons formées entre les micelles ont un impact sur la fermeté du gel. Pendant l'affinage, le calcium et le phosphate diffusent vers l'extérieur du fromage à cause du gradient de pH formé à la suite de l'activité de la microflore d'affinage en surface (Karahadian & Lindsay, 1987). Les minéraux sont insolubles à un pH élevé, c'est pourquoi ils précipitent sous forme de phosphate de calcium lorsqu'ils arrivent à la surface et confèrent la couleur blanche caractéristique du Camembert (Le Graet et al., 1983).

Le coagulum est ensuite coupé en grains (petits dés) et ceux-ci sont mis en moule (Johnson & Law, 2010). L'égouttage commence dans les moules qui sont perforés. Le tranchage, le moulage et l'égouttage sont des étapes qui permettent au lactosérum de sortir du caillé. En contrôlant ces étapes, le maître fromager module le contenu en humidité final du fromage. Dans un fromage Camembert traditionnel, le pH au démoulage du caillé a atteint un pH 4,6 suite à une acidification intense par les ferments lactiques (*Lactococcus* homofermentaires mésophiles) pendant l'égouttage (Spinnler & Gripon, 2004).

Le salage des fromages est effectué après le démoulage par salage à sec ou par saumurage. Le salage à sec consiste à appliquer du sel dans la masse (sur les cubes de caillés) ou à la surface des fromages. Le saumurage consiste à immerger les fromages dans une solution sursaturée en sel (Gillis, 2004). Le salage, en concomitance avec les autres barrières technologiques, est une étape importante dans la fabrication des fromages de type Camembert, car celui-ci permet de sélectionner et de moduler la microflore d'affinage ainsi que d'inhiber la croissance de micro-organismes indésirables. Le fromage Camembert est caractérisé par son affinage en surface par la microflore constituée en particulier de *Penicillium camemberti* et de *Geotrichum candidum*, ainsi que sa texture de pâte molle (Spinnler & Gripon, 2004). La croissance de *G. candidum* est limitée par une trop grande quantité de sel et est favorisée par une faible quantité de sel (Spinnler & Gripon, 2004). La croissance de *P. camemberti* n'est pas affectée par une trop grande quantité de sel comme *G. candidum*, mais est réduite lorsque cette dernière levure croit en excès (Spinnler & Gripon, 2004). Trop peu de sel favorise la croissance de microorganismes indésirables dans les fromages. Le salage permet de diminuer l'humidité de la pâte pour éviter des défauts d'apparence comme le défaut de « poils de chat » (*Mucor* sp.) (Spinnler & Gripon, 2004). L'activité des enzymes de la

microflore d'affinage est modulée par le salage et est augmentée ou réduite en fonction des conditions rencontrées (Spinnler & Gripon, 2004).

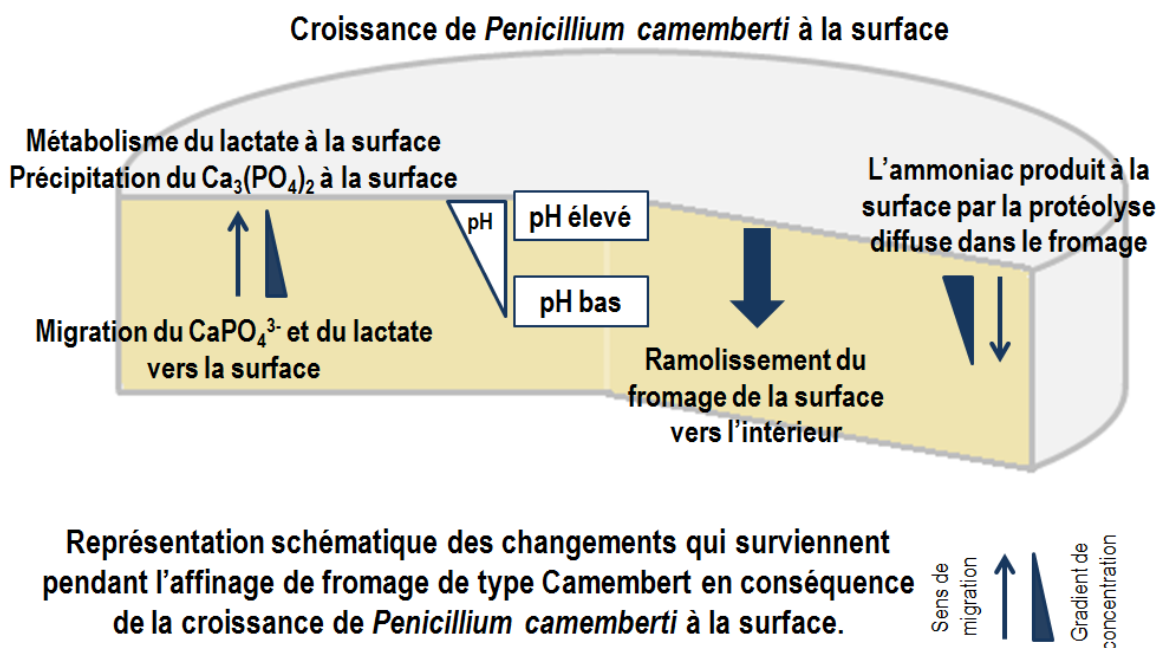


Figure 1-1. Phénomènes physico-chimiques se déroulant pendant l'affinage d'un fromage de type Camembert.¹

¹ Adapté de McSweeney et Fox (2004).

La microflore du Camembert évolue en fonction du temps durant la fabrication et l'affinage (Spinnler & Gripon, 2004) (figure 1-1). Dans les fromages au lait cru, les différents paramètres technologiques comme le salage, l'égouttage et le pH permettent de sélectionner les micro-organismes désirables et de réduire la croissance des micro-organismes indésirables. Dans les fromages au lait pasteurisé, une microflore de départ est ajoutée selon le type de fromage à fabriquer (traditionnel ou stabilisé). Les changements chimiques dans le lait qui se transforme en caillé et ensuite en fromage engendrent une succession de micro-organismes. Pendant l'étape de fermentation, les bactéries lactiques transforment le lactose en lactate, ce qui résulte en une réduction du pH pendant le caillage et l'égouttage (Spinnler & Gripon, 2004). Au début de l'affinage, les micro-organismes acidophiles, comme les levures et les champignons filamenteux, sont avantagés par l'acidification du caillé.

Les levures (surtout *G. candidum*) et les champignons filamenteux (surtout *P. camemberti*) vont croître et former une dense couche blanche à la surface en consommant l'acide lactique (lactate) du fromage et l'oxygène de l'environnement durant l'étape d'affinage. Durant la première semaine d'affinage, *P. camemberti* va couvrir entièrement la surface, formant la traditionnelle couche feutrée blanche et dense. Le développement des bactéries d'affinage est favorisé par la croissance de la microflore de surface lorsque le pH remonte au-delà de 5,8. Le lactate à la surface du fromage est rapidement consommé par la microflore de surface, ce qui cause une augmentation du pH à partir de la surface et un relâchement de CO₂ dans la chambre d'affinage à la suite du processus de respiration. Le lactate du centre du fromage migre vers la surface. Un gradient de pH prend place à l'intérieur du fromage, soit un centre plus acide que la surface, chacun ayant respectivement un pH d'environ 6,0 et 7,0 en fin d'affinage. La remontée du pH permet l'établissement de bactéries acidosensibles qui contribuent au développement des saveurs du Camembert, à l'activité optimale des enzymes d'affinage, à la migration du phosphate de calcium vers la surface du fromage ainsi qu'à l'amollissement caractéristique de l'extérieur vers l'intérieur du fromage Camembert (Guinee & Fox, 2004). Durant l'affinage, les enzymes de *P. camemberti* sont très actives près de la surface, mais leurs activités sont limitées par leur faible diffusion dans la pâte (Desmazeaud et al., 1976; Spinnler & Gripon, 2004). La présure, mieux retenue dans le fromage Camembert que dans d'autres types de fromage comme les fromages pressés (Vassal & Gripon, 1984), dégrade la majorité de la caséine α_{s1} du réseau protéique durant l'affinage avec un optimum d'activité à un pH autour de 5,5. Lorsque le pH augmente, la solubilité des caséines augmente aussi en raison de l'augmentation de la charge nette des caséines, résultant de l'augmentation du pH par la microflore d'affinage: les interactions protéines-protéines et protéines-eau sont alors modifiées pendant l'affinage par tous les phénomènes qui se déroulent en même temps (Spinnler & Gripon, 2004).

1.3.3. Fromages à pâte molle à croûte fleurie commerciaux

Il existe sur le marché différents fromages commerciaux à pâte molle à croûte fleurie. Des variations au niveau de certains paramètres lors de la fabrication des fromages mènent à des produits finaux avec des qualités organoleptiques et texturales particulières. La fabrication du fromage Brie traditionnel avec une appellation d'origine contrôlée (qui protège les produits faits dans une zone géographique distincte et dont les étapes de fabrications sont contrôlées), comme par exemple le

Brie de Meaux, est décrite par Spinnler et Gripon (2004). Brièvement, une culture de départ mésophile est ajoutée au lait cru (Spinnler & Gripon, 2004). La présure est ajoutée au lait lorsqu'il est acidifié jusqu'à un pH d'environ 6,4 (Spinnler & Gripon, 2004). La coagulation du lait se déroule de 30 à 45 minutes (Spinnler & Gripon, 2004). Le caillé est transféré, de façon manuelle en utilisant une louche ou par un système automatique, dans des moules perforés sur les côtés (Spinnler & Gripon, 2004). L'égouttage du caillé se fait pendant les premières heures à une température avoisinant 27 °C qui est ensuite réduite autour de 20 °C pour les dernières heures (Spinnler & Gripon, 2004). Pendant l'égouttage, les bactéries lactiques vont acidifier le caillé (Spinnler & Gripon, 2004). Le pH du caillé à la fin de l'égouttage est autour de 4,65 (Spinnler & Gripon, 2004). Le caillé obtenu contient une faible teneur en minéraux (Spinnler & Gripon, 2004). Le salage du Camembert traditionnel est habituellement effectué par le salage à sec (Spinnler & Gripon, 2004). Le fromage est ensuite affiné dans des chambres d'affinage à une température autour de 12 °C et une humidité relative de 90 % pendant environ 21 jours (Spinnler & Gripon, 2004).

Les fromages Camembert sans désignation d'origine peuvent être fabriqués comme le Camembert traditionnel, mais avec quelques distinctions (Spinnler & Gripon, 2004). Le lait, cru ou pasteurisé, coagule dans un système de production continu. Le moulage du caillé est effectué de façon manuelle ou automatique dans des multi-moules de 30 à 50 minutes après le coupage du caillé en cubes de 2,0 à 2,5 cm. Le salage des caillés est effectué par saumurage et non par salage à sec.

Des modifications au niveau de la technologie des fromages à pâte molle à croûte fleurie ont permis de fabriquer des fromages de type stabilisé (Spinnler & Gripon, 2004). Le lait est inoculé avec une culture de départ thermophile. L'emprésurage du lait pasteurisé est effectué après la maturation du lait dont la durée est moins longue. Le caillé est brassé et lavé après avoir été coupé en cubes de 0,7 à 1,0 cm. Le moulage est précédé d'une étape de pré-égouttage. Le pH du caillé à la fin de l'égouttage est plus élevé que pour le caillé du fromage traditionnel, ce qui donne un caillé davantage minéralisé et ayant un pouvoir tampon plus élevé. L'étape de lavage permet d'enlever une grande quantité de lactose et donc de ralentir l'acidification du caillé au démoulage, ce qui permet d'obtenir un fromage à croûte fleurie plus rapidement et ayant un goût plus léger que les fromages traditionnels. Celui-ci a moins tendance à ramollir pendant l'affinage et garde sa forme lorsqu'il est coupé.

1.4. Les impacts de la matrice fromagère sur la bioaccessibilité des protéines

1.4.1. Bioactivité des protéines lactières

Le lait utilisé en fabrication fromagère est composé d'environ 80 % de protéines sous forme de caséines et environ 20 % sous forme sérique. Une des étapes de la transformation du lait en fromage est le soutirage du lactosérum du caillé. Les protéines contenues dans le fromage représentent environ 75 % des protéines du lait de départ (Fox & McSweeney, 2004). Il s'agit majoritairement des caséines et minoritairement des protéines du lactosérum. La digestibilité des protéines du fromage est presque totale à 100 % (O'Brien & O'Connor, 2004). Les caséines et les protéines du lactosérum jouent plusieurs rôles importants chez l'humain. Les caséines favorisent l'anabolisme des protéines (Calbet & Holst, 2004), ralentissent la vidange gastrique (Mahé et al., 1991) et influencent la prise alimentaire (Luhovyy et al., 2007). Les protéines du lactosérum favorisent la contraction de l'iléon (Pihlanto-Leppälä et al., 1997), ont des activités opioïdes (Antila et al., 1991), antimicrobiennes (Bellamy et al., 1992), hypotensives (Luhovyy et al., 2007; Miguel et al., 2010) ainsi qu'une influence au niveau la balance énergétique (Hursel et al., 2010). Les effets physiologiques induits par les protéines dépendent de leur bioaccessibilité et leur biodisponibilité. La libération d'un nutriment d'une matrice alimentaire dans les liquides digestifs au niveau du tractus gastro-intestinal est la définition de la bioaccessibilité (Versantvoort et al., 2005). La biodisponibilité est définie par la proportion d'un nutriment libéré qui est absorbée et qui rejoint la circulation systémique (Turgeon & Rioux, 2011).

1.4.2. Digestion des protéines

Afin que les nutriments deviennent biodisponibles et soient utilisés par l'organisme, les aliments doivent être digérés. La digestion se décrit en quelques étapes majeures très bien documentées (Turgeon & Rioux, 2011). L'étape orale consiste à briser mécaniquement les aliments en petites particules dans le but de créer un bol alimentaire avec la salive. La salive contient entre autres de l'amylase qui digère les sucres. Le bol alimentaire passe par l'œsophage afin de se rendre à

l'estomac. La désintégration des particules d'aliments continue à l'étape gastrique par des forces physiques (distension stomacale, friction entre la paroi et les particules et entre les particules elles-mêmes) et à l'aide des jus gastriques acides qui contiennent des sels biliaires et des enzymes comme la pepsine et la lipase. À partir de ce moment, les nutriments commencent à être libérés de la matrice alimentaire. La pepsine a ainsi accès aux protéines libérées et commence leur protéolyse. Quand les particules du contenu de l'estomac atteignent une taille suffisamment petite (inférieure à 2 mm), le contenu gastrique est déversé dans le petit intestin par des mouvements péristaltiques. La vidange gastrique est plus rapide pour les aliments moins fermes comparativement aux aliments très fermes (Kong & Singh, 2008). Les sécrétions pancréatiques basiques favorisent la libération des peptides et des acides aminés par l'action des enzymes comme la trypsine et la chymotrypsine. L'absorption des tripeptides, dipeptides et acides aminés est effectuée au niveau de la muqueuse intestinale. L'état physique du nutriment dans la matrice ainsi que sa facilité à être libéré de la matrice sont des exemples de facteurs qui influencent la biodisponibilité des nutriments (Fairweather-Tait & Southon, 2003).

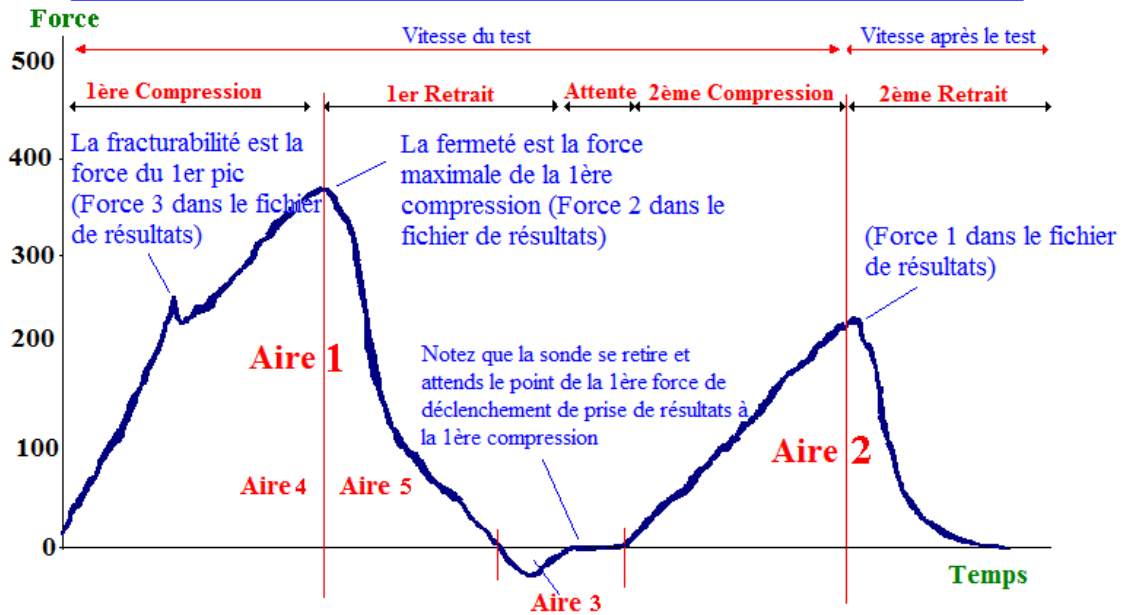
1.4.3. Impact de la texture du fromage sur la libération des protéines pendant la digestion

De plus en plus d'études indiquent que la bioaccessibilité et la biodisponibilité des nutriments peuvent être influencées par la matrice, ce qui a été démontré pour de nombreux composés d'intérêts dans diverses matrices alimentaires (Aguilera, 2005; Norton et al., 2007; Turgeon & Rioux, 2011). L'effet de la structure des aliments sur leur comportement pendant la digestion gastro-intestinale a différents intérêts comme l'élaboration de nouveaux produits avec des propriétés fonctionnelles dans le but d'améliorer la santé (Parada & Aguilera, 2007; Sensoy, 2014; Singh et al., 2015) ainsi que l'évaluation des impacts d'un procédé sur les propriétés intrinsèques d'un aliment (Barbé et al., 2014; Barbé et al., 2013; Kong & Singh, 2008, 2009).

La texture des fromages est très importante pour le consommateur, car elle fait partie des attributs caractéristiques de plusieurs variétés de fromages. Avant d'être consommé, le fromage passe par plusieurs étapes avant d'arriver sur les tablettes de l'épicerie: la fabrication, l'emballage, la distribution aux détaillants, la vente ou bien l'utilisation industrielle (ex. aliments transformés,

restauration, etc.) (O'Callaghan & Guinee, 2004). La texture du fromage influence leur conditionnement. Par exemple le fromage Cottage doit être mis en pot à cause de sa texture plutôt liquide, tandis que le fromage Camembert nécessite d'être recouvert d'une pellicule avec une composition particulière et facultativement mis dans une boîte afin que les fromages continuent à respirer et conservent leur forme pendant la distribution. Pour le consommateur, la texture a une grande influence sur l'appréciation générale des fromages. Dans le cas des fromages à pâte molle à croûte fleurie, certains consommateurs les préfèrent à un stade très avancé de la maturation où la pâte est très coulante, voire même quasi-liquéfiée, souvent associée aux arômes très prononcés des fromages Camembert traditionnels, tandis que d'autres les préfèrent plutôt doux avec une pâte peu ou pas coulante caractéristique des fromages Camembert stabilisés. Durant l'affinage du Camembert, la pâte s'amollit de l'extérieur vers l'intérieur, même si le fromage est conservé à 4 °C. Ceci est dû aux phénomènes simultanés précédemment discutés tels que la croissance de la microflore de surface, l'établissement du gradient de pH, résultant de la migration de l'acide lactique du centre vers la surface, ainsi que la protéolyse due aux enzymes de la microflore et par la présure résiduelle. Une méthode rapide permettant de recueillir plusieurs informations au niveau de la texture est l'analyse du profil textural (TPA pour « *Textural profil analysis* » en anglais) effectuée à l'aide d'un texturomètre (figure 1-2). Différents paramètres de textures sont alors obtenus à la suite d'une double compression sur un échantillon de l'aliment étudié (tableau 1-1).

Calculs pour l'Analyse du Profil Textural pour le logiciel «Texture Expert»



Cohésion = Aire 2 / Aire 1

Capacité gommante = Aire 2 / Aire 1 * Fermeté (Force 2)

Résilience = Aire 5 / Aire 4

Adhésion = Aire 3

Notez que la vitesse après le test doit être la même que la vitesse du test pour que les deux compressions se déroulent sous des circonstances identiques et pour que l'intégration des aires soit entièrement comparables.

Figure 1-2. Schéma des calculs effectués par le logiciel « Texture Exposit Software » des paramètres de l'analyse du profil textural des fromages Brie expérimentaux. Schéma adapté de « Texture Technologies Corp & Stable Micro Systems » (2015).

Tableau 1-1. Termes, définitions et calculs des paramètres de texture pour un aliment semi-solide comme le fromage Brie.¹

Paramètres TPA	Définition	Calcul	Coefficient
Fermeté	Force maximale requise pour comprimer un aliment	Force, en Newton	H1
Fracturabilité ²	Force à laquelle un aliment se brise	Force du 1 ^{er} pic, en Newton	Force 3
Cohésion	Degré de liaison entre les particules de l'aliment	Rapport de surfaces de la 2 ^{ème} déformation sur la 1 ^{ère} , sans dimension	A2/A1
Capacité gommante	Énergie requise pour désintégrer et avaler un aliment semi-solide	Fermeté X Cohésion, en Newton	H1 X (A2/A1)
Résilience	Degré auquel l'aliment retourne à sa forme initiale lors de la 1 ^{ère} compression	Rapport de la 2 ^{ème} moitié de surface de la 1 ^{ère} compression sur la 1 ^{ère} moitié de surface de la 1 ^{ère} compression, sans dimension	A5/A4
Adhésion	Degré de force requise pour décoller un aliment des surfaces	Travail négatif entre les deux compressions, en Newton X secondes	A3

¹ Définitions adaptées de Bourne (2002). ² La fracturabilité ne peut pas être mesurée pour tous les aliments puisque certains aliments ne se fracturent pas à certaines conditions d'analyse du profil textural.

1.4.3.1. Désintégration de la matrice alimentaire

Bornhorst, Ferrera et Singh (2015). ont proposé un « Système de Classification de la Désintégration des Aliments » (SCDA ou en anglais « *Food Breakdown Classification System* » (FBCS)) pour prédire le comportement des aliments solides pendant la digestion gastrique *in vitro* et *in vivo* basé sur leur fermeté initiale et leur vitesse de solubilisation dans des conditions simulant la digestion gastrique. Comme décrites à la section 1.4.2, la désintégration et la dissolution sont les deux étapes

distinctes du processus de digestion d'un aliment (Kong & Singh, 2008). La digestion d'un aliment débute par le bris de la matrice en plus petits fragments (désintégration) à partir desquels les nutriments peuvent être libérés par des actions physiques, chimiques et enzymatiques (dissolution). Les propriétés intrinsèques de l'aliment, la cinétique de désintégration et le temps de résidence dans les compartiments digestifs influencent la désintégration d'un aliment. En effet, la structure et la composition d'un aliment affecteront sa capacité à se défaire et à se dissoudre dans les conditions acides et enzymatiques pendant la digestion gastrique. La vitesse de la désintégration de la structure de l'aliment affecte directement le processus de désintégration subséquent qui est la désintégration enzymatique qui résulte en l'hydrolyse des nutriments (ex. protéines) de l'aliment (Turgeon & Rioux, 2011). Un aliment qui se désintègre plus lentement dans l'estomac devra subir le processus de digestion gastrique plus longtemps, et sera donc mélangé plus longtemps. Il recevra également plus de sécrétions gastriques avant de poursuivre dans le tractus gastro-intestinal. Bornhorst et coll. (2015) ont émis l'hypothèse que le fromage se positionnerait dans la classe II du SCDA avec les aliments à fermeté moyenne et à humidité intermédiaire avec une structure (dans ce cas-ci d'un gel protéique). Les aliments de cette classe se ramolliraient rapidement en conditions de digestion gastrique. Un aliment à fermeté moyenne et à humidité intermédiaire qui aurait plutôt une structure compacte, comme des pâtes cuites, se positionnerait dans la classe V du SCDA et aurait plutôt tendance à se ramollir lentement en conditions de digestion gastrique. Cet exemple démontre que la microstructure influence la vitesse de ramollissement de l'aliment et donc aussi le temps pour atteindre une désintégration complète.

L'impact de la structure de la matrice sur la digestion a été rapporté dans une étude récente sur les fromages Cheddar doux, Cheddar vieilli, Cheddar faible en matières grasses et Mozzarella (Lamothe et al., 2012). Le fromage Cheddar vieilli se désintègre plus rapidement au début de la digestion gastrique, car il est plus friable, moins élastique et moins cohésif que les autres fromages. Malgré cette différence en début de digestion, les fromages présentent toutefois une progression similaire de la désintégration en fonction du temps pour arriver à la fin de la digestion gastrique avec des indices de désintégration de la matrice entre 25 % et 65 %. Une moins grande désintégration à la phase gastrique de la digestion *in vitro* est associée à des fromages plus cohésifs et élastiques (Lamothe et al., 2012). La désintégration du fromage a été étudiée dans le Cheddar enrichi en calcium (Ayala-Bribiesca et al., 2016) dans des conditions de digestion semblables aux travaux antérieurs de

Lamothe et al. (2012). L'ajout en calcium a augmenté la fermeté des fromages causant un ralentissement de la désintégration. Bien que la désintégration soit ralentie, la lipolyse était plus élevée dans le Cheddar enrichi en calcium, expliqué par de plus grands amas de matières grasses plus facilement libérés.

Le modèle *in vitro* utilisé dans l'étude de Fang, Labrie et Turgeon (2016a) imite la digestion humaine en contrôlant la température de digestion, la vitesse d'agitation, les solutions digestives ajoutées aux différentes étapes de digestion et le temps attribué à chaque étape de digestion (orale, gastrique et duodénale), ce qui en fait un modèle rapide pour comparer divers aliments. Les travaux de Fang et al. (2016a) sur différentes variétés de fromages (Camembert de type stabilisé, Mozzarella, Cheddar jeune, Cheddar âgé, fromage à croûte lavée) ont démontré que la vitesse de désintégration de la matrice fromagère pendant la digestion *in vitro* serait modulée par la composition et certaines caractéristiques texturales. Un fromage à pâte molle comme le Camembert est davantage désintégré à la suite de la digestion gastrique comparativement à un fromage plutôt élastique comme le Mozzarella. Les corrélations ont démontré que plus un fromage est riche en matières grasses, plus il sera désintégré à la suite de la digestion gastrique et que plus le fromage a un degré de protéolyse élevé, plus il sera désintégré à la suite de la digestion duodénale.

1.4.3.2. Bioaccessibilité des protéines pendant la digestion

La revue de littérature réalisée par Turgeon et Rioux (2011) rassemble les résultats récents démontrant l'impact de la vitesse de libération des nutriments comme les glucides, les lipides et les protéines sur plusieurs réponses physiologiques et certains impacts sur la santé. Cette revue a mis en évidence l'intérêt d'étudier la cinétique de libération des nutriments. Cette approche a été premièrement utilisée pour le concept d'index glycémique qui est une évaluation de la cinétique d'apparition du glucose dans le sang (Jenkins et al., 1981). Des bénéfices santé, comme chez les patients diabétiques ayant une glycémie mieux contrôlée, sont attribués à un index glycémique faible soit une libération et une absorption lentes et progressives du glucose (Jenkins et al., 2002). L'absorption et la biodisponibilité du glucose peuvent être retardées par différents facteurs comme une matrice dense qui défavorise l'accès des enzymes à leur substrat et un état plus visqueux des sécrétions gastriques causé par les fibres alimentaires qui ralentissent la vidange gastrique (Turgeon

& Rioux, 2011). Le concept de l'index glycémique peut être transposé au profil sanguin pour d'autres composés tels que des macronutriments lipidiques et protéiques (Turgeon & Rioux, 2011). La bioaccessibilité des protéines est intéressante dans les cas de libération rapide ou lente dont Turgeon et Rioux (2011) ont apporté des exemples pour les personnes âgées et en ce qui concerne le concept de satiété. Chez les personnes âgées, il serait bénéfique de consommer des protéines rapidement absorbées, en comparaison avec des protéines lentement absorbées, afin de limiter la perte de masse musculaire (Dangin et al., 2003) qui augmente les risques de santé (De Souza Genaro & Martini, 2010; Phillips et al., 2009). L'autre réponse physiologique influencée par la bioaccessibilité des protéines est la satiété. Le sentiment de satiété a été expliqué par divers mécanismes (Veldhorst et al., 2008; Westerterp-Plantenga et al., 2009) tels que l'augmentation des concentrations en hormones impliquées dans les signaux de satiété, la dépense énergétique de la digestion des protéines et les variations des concentrations en acides aminés. De plus, la présence de fibres (par exemple le psyllium) rend le bol alimentaire plus visqueux dans l'estomac augmentant le temps de résidence, ainsi que le sentiment de satiété comparativement à la consommation du même repas sans fibres (Bergmann et al., 1992).

L'impact d'un traitement technologique (traitement de chaleur du lait ou non) ainsi que l'effet de la structure de l'aliment (gélification du lait ou non) sur la cinétique de digestion et d'absorption des protéines du lait ont été étudiés avec un modèle animal, le mini-porc (Barbé et al., 2013). Dans le lait cru, les caséines ont été plus sensibles à l'hydrolyse gastrique que la β -lactoglobuline qui était résistante. Pour le lait chauffé, les caséines et la β -lactoglobuline ont présenté la même sensibilité à l'hydrolyse, démontrant que la digestion d'une composante d'un aliment peut être affectée par un traitement technologique. La digestion des protéines a aussi été affectée par la structure de l'aliment, car l'apparition des acides aminés dans le plasma a été retardée pour les aliments gélifiés. Ceci est expliqué par un temps de passage de l'estomac vers l'intestin augmenté.

La méthode de coagulation du lait fromager, soit la coagulation acide (gel acide) et la coagulation par la présure (gel présure), a aussi influencé la cinétique de biodisponibilité des caséines et de la β -lactoglobuline chez le mini-porc (Barbé et al., 2014). En effet, les acides aminés des protéines provenant du gel présure arrivent moins rapidement dans le sang que ceux provenant du gel acide pour des matrices laitières gélifiées de même composition et de propriétés rhéologiques semblables.

Selon leurs résultats de microscopie confocale, la microstructure du réseau de caséines n'était pas différente entre les gels coagulés par l'acidification et par l'action de la présure. Pendant la digestion gastrique, la floculation et l'absence de synérèse décrit le comportement du gel acide, tandis que la floculation et une synérèse importante décrit celui du gel présure. L'apparition plus lente des acides aminés dans le plasma est expliquée par la forte contraction des particules du gel présure, limitant la protéolyse enzymatique (les enzymes ont moins facilement accès au site de coupure des protéines) et augmentant le temps de rétention des particules dans l'estomac, ce qui retarde alors la vidange gastrique.

La viscosité de la matrice alimentaire est aussi un facteur influençant la cinétique de digestion des protéines, tel que démontré pour des yogourts à différents ratios de caséines et de protéines du lactosérum (Rioux & Turgeon, 2012). Pour un même aliment avec différentes teneurs en protéines et propriétés rhéologiques différentes, le comportement à la digestion a varié: un yogourt plus riche en protéines du lactosérum a été digéré plus lentement (Rioux & Turgeon, 2012). Les auteurs ont suggéré que l'agrégation des protéines du lactosérum, différente selon les ratios caséines/protéines sériques étudiés, a eu un impact sur la digestion.

1.4.4. Modèles de digestion *in vitro*

L'étude de la digestion des aliments lors de son passage dans le tractus gastro-intestinal directement chez les sujets humains est très invasive et coûteuse. C'est pourquoi plusieurs modèles de digestion *in vitro* ont été développés afin de réaliser plus facilement des expérimentations sur le processus de digestion. Les modèles de digestion *in vitro* comportent plusieurs avantages pour la conduite d'études préliminaires à moindre coût permettant le contrôle de divers facteurs tels que la température, le temps de résidence selon les étapes de digestion, la quantité d'aliments ajoutée, l'uniformité de la préparation de l'aliment par broyage mécanique et le volume des solutions ajoutées. Il s'agit également d'un design expérimental plus simple comparativement aux études chez l'humain. La reproductibilité des données obtenues est supérieure aux études *in vivo* puisque le modèle ne tient pas compte de la variabilité inter-individu des sujets humains. Les études *in vitro* ne peuvent pas remplacer les études *in vivo* pour la validation des résultats en conditions réelles, mais elles

permettent de répondre plus rapidement à des questions spécifiques et de valider l'importance de la poursuite des travaux chez les animaux et les humains.

Différents modèles de digestions *in vitro* ont été utilisés, soient les modèles bi/multi-compartimentés et dynamiques, ainsi que les modèles mono-compartimentés et statiques (toutes les phases sont dans un seul récipient). Les modèles bi/multi-compartimentés permettent de simuler plusieurs phénomènes physiologiques comme la vidange gastrique et la sécrétion de jus digestifs. C'est le cas du système dynamique de digestion gastro-intestinal *in vitro* TNO (TIM-1, en anglais « *TNO intestinal model* ») développé par la compagnie « *TNO Nutrition and Food Research* » (Zeist, Pays-Bas) (Minekus et al., 1995). Cependant, ces modèles sophistiqués sont coûteux.

Les modèles de digestion mono-compartimentés sont plus simples. Ils ne permettent cependant pas de simuler les phénomènes physiologiques dynamiques, ni de déterminer la biodisponibilité des nutriments. La désintégration et la bioaccessibilité des nutriments peuvent être étudiées par ces modèles plus simples où la durée des étapes peut être adaptée selon les objectifs de l'étude et les contraintes expérimentales.

Le modèle de digestion de Versantvoort et coll. (2005) a été adapté pour le fromage par notre équipe de laboratoire (article non publié) et aussi par Lamothe et coll. (2012). Il s'agit d'un modèle largement utilisé, car le protocole a été établi sur la base d'un recensement exhaustif des études antérieures (Versantvoort et al., 2005). La composition des fluides digestifs, le pH et le temps de résidence pour les différentes étapes de digestion (orale, gastrique et duodénale) sont les paramètres contrôlés afin de reproduire les conditions gastro-intestinales chez l'humain dans un modèle simple de digestion *in vitro* (Versantvoort et al., 2005).

Les forces physiques sont imitées par l'agitation. L'agitation et la température de la digestion de 37 °C sont contrôlées par l'utilisation d'un rhéomètre. L'utilisation du rhéomètre permet d'avoir des informations supplémentaires sur le digestat, soit la viscosité du mélange en fonction du temps de digestion. Le pH est contrôlé en fonction du temps par l'ajout d'acide chlorhydrique et d'hydroxyde de sodium pour contrer l'effet tampon de l'aliment. Le système est utilisé pour étudier les étapes gastrique et duodénale de la digestion. Il n'est pas nécessaire de mimer les conditions du gros

intestin, car la libération des nutriments se fait surtout au niveau de l'estomac et du petit intestin. Des études comparatives peuvent être réalisées par ce modèle pour étudier certains paramètres grâce à la simplicité et la rapidité du modèle comparativement aux systèmes continus. Ce modèle comporte tout de même certaines limitations. Le modèle ne prend pas en compte l'arrivée graduelle des aliments dans les compartiments de digestion, les phénomènes de sécrétions digestives et de la vidange gastrique, des facteurs pouvant aussi influencer la bioaccessibilité des nutriments.

Rapport-Gratuit.com

Mise en contexte, hypothèse et objectifs

La réduction en sodium dans les fromages est encouragée par Santé Canada dans le but de réduire la consommation de sodium chez les Canadiens. Les industries fromagères ne peuvent pas simplement réduire la teneur en chlorure de sodium (NaCl) dans les différentes variétés de fromage puisque le NaCl maintient plusieurs rôles notamment au niveau technologique, microbiologique et évidemment organoleptique. Plusieurs travaux se penchent sur les répercussions de la réduction en sodium dans les fromages populaires, particulièrement dans le Cheddar. Les fromages de spécialités comme les fromages à pâte molle à croûte fleurie connaissent une popularité grandissante depuis les dernières années auprès des Québécois. Cependant, peu d'études décrivent les impacts de la réduction en sodium dans les fromages comme le Brie et le Camembert. Dans ces fromages, l'importante microflore diversifiée est responsable de différents phénomènes successifs pendant la fabrication et l'affinage qui procurent leurs caractéristiques organoleptiques particulières comme la croûte blanche feutrée, la pâte coulante et les saveurs particulières. Cette microflore est, entre autres, modulée par l'ajout de NaCl lors de l'étape de salage, qui permet d'une part de compléter l'égouttage et aussi de contrôler la croissance des micro-organismes. Réduire le NaCl dans l'objectif de réduire le contenu en sodium des fromages pourrait avoir un impact sur la microflore du Brie et pourrait affecter l'évolution de la texture durant l'affinage de ce type de fromage. Bien qu'une étude sur la réduction du sodium par la substitution au chlorure de potassium (KCl) ait été effectuée sur le Camembert, les changements de texture pendant l'affinage n'ont pas été quantifiés bien qu'ils aient été décrits par un panel de dégustation.

Plusieurs études sur la désintégration et la libération des protéines d'une matrice alimentaire ont démontré que certains traitements technologiques ou certaines variations dans la composition de l'aliment ont modifié le comportement de l'aliment lors de la digestion dans des conditions simulant la digestion humaine. Un paramètre qui pourrait modifier la vitesse de désintégration en conséquence de la réduction en sodium du fromage Brie serait la modification de la microstructure de l'aliment. En effet, la microstructure pourrait être affaiblie au niveau du réseau protéique et pourrait présenter, entre autres, une moins grande fermeté. Si la texture est différente entre les fromages expérimentaux, la cinétique de désintégration pourrait être affectée et subséquemment la vitesse de libération des protéines pendant la digestion gastrique. En sachant que la réduction du sodium

pourrait modifier la texture du fromage Brie, il est intéressant d'évaluer la désintégration du fromage et la libération des protéines de la matrice en utilisant un modèle de digestion *in vitro* simulant les conditions de digestion gastro-intestinales humaines pour des études préliminaires.

L'hypothèse de cette étude s'énonce comme suit :

La réduction en sodium dans un fromage à pâte molle à croûte fleurie influence la texture pendant l'affinage ainsi, que la bioaccessibilité des protéines pendant la digestion *in vitro* simulant les conditions gastro-intestinales chez l'humain.

Les objectifs à atteindre pour répondre à l'hypothèse à l'étude sont les suivants:

- 1) Fabriquer en industrie des fromages Brie standard et réduits en sodium par réduction nette et par substitution au chlorure de potassium;
- 2) Déterminer la composition totale des fromages Brie standard et réduits en sodium;
- 3) Déterminer le degré de protéolyse et les caractéristiques texturales pendant l'affinage des fromages Brie standard et réduits en sodium;
- 4) Déterminer la bioaccessibilité des peptides laitiers et la cinétique de dégradation des fromages Brie standard et réduits en sodium lors de conditions simulant la digestion humaine.

Chapitre 2. Effet de la réduction en sodium et de sa substitution sur la texture d'un fromage à pâte molle à croûte fleurie

« Effect of sodium reduction and its replacement on the texture of surface mould-ripened soft cheese »

Christine Vallières ∴ Laurie-Eve Rioux ∴ Steve Labrie ∴ Sylvie L. Turgeon

Centre de recherche en sciences et technologie du lait (STELA)

Institut sur la nutrition et les aliments fonctionnels (INAF)

Département des Sciences des aliments, Université Laval, Québec, Québec, Canada.

L'objectif du chapitre 2 est de déterminer l'effet de la réduction en sodium et de sa substitution sur la composition du fromage Brie à condition saline standard, réduite en sodium par réduction nette et réduite en sodium par substitution au chlorure de potassium. Le degré de protéolyse et l'analyse du profil textural en fonction de l'affinage sont aussi évalués pour les trois types de fromages expérimentaux.

2.1. Résumé

La surconsommation du sodium (Na) est considérée mondialement comme étant liée à l'incidence de l'hypertension et des problèmes cardiovasculaires. Santé Canada vise une diminution du sodium dans les produits transformés, ce qui comprend toutes les variétés de fromages. Ceux-ci sont responsables de 5 % de l'apport quotidien en sodium dans l'alimentation des Canadiens. Le sel (NaCl) joue plusieurs rôles importants dans les fromages aux niveaux technologique, microbiologique et organoleptique. La réduction du sodium dans les fromages a été étudiée selon différentes méthodes, les plus populaires étant la réduction nette de la quantité de sodium ainsi que la réduction du sodium combinée à une substitution partielle par un autre sel comme le chlorure de potassium (KCl). Plusieurs études de différentes variétés de fromage ont démontré qu'il est possible de substituer une partie du NaCl par du KCl sans affecter les qualités du produit final telles que la composition, la protéolyse et la texture. Cependant, peu d'études s'attardent sur les fromages de spécialité comme les fromages à pâte molle à croûte fleurie. Le but du projet était de déterminer si la réduction en sodium affectait les propriétés texturales du fromage Brie pendant l'affinage afin d'appuyer le développement de fromage avec de meilleurs attributs santé. Des fromages Brie variant dans leur teneur en sodium (contrôle (CTL), réduite (R) et substituée au KCl (S)) ont été produits en conditions industrielles et leur composition a été déterminée. Le degré de protéolyse et les caractéristiques texturales ont été étudiés en fonction de l'affinage à l'aide de l'analyse du profil textural (TA-XT₂). Une réduction en sodium de 23 % a été obtenue dans les fromages R et S. Le temps d'affinage affecte la protéolyse et certains paramètres de texture. Une variabilité a été observée entre les répétitions, reflétant des variations parfois retrouvées en industrie. Toutefois, dans une même répétition, les fromages des différentes conditions expérimentales n'étaient pas différents au niveau de la protéolyse et de la texture. Ces travaux démontrent qu'il est possible de réduire le sodium sans affecter la protéolyse et la texture du fromage Brie.

2.2. Abstract

Sodium overconsumption is associated with high blood pressure which is responsible for several cardiovascular diseases. Health Canada seeks a sodium reduction in processed products, which includes all cheese varieties. Globally, cheeses provide 5% of the sodium in the daily diet. Salt (NaCl) plays important technological, microbiological and organoleptic roles in cheeses. Reducing sodium in cheese was studied by various methods, the most popular being the net reduction of the amount of sodium and sodium reduction through partial substitution with another salt such as potassium chloride (KCl). Several studies of various cheese varieties have shown that it is possible to substitute a part of NaCl by KCl without affecting the qualities of the final product such as the composition, proteolysis and texture. However, only few studies focused on specialty cheeses such as surface mould-ripened soft cheeses. The project's goal was to determine if the sodium reduction affected the textural properties of cheese during ripening to support the development of cheese with better health attributes. Brie cheeses with different sodium levels ((CTL) Control, (R) Reduced and (S) Substituted with KCl) were produced in industrial conditions and their composition was determined. The degree of proteolysis and textural characteristics were studied in function of ripening time using textural profile analysis (TA-XT₂). A sodium reduction of 23% was achieved for the conditions R and S. The ripening time affects cheese proteolysis and some of texture parameters. Variability was observed between batches, reflecting variations normally found in industry. However, for the same batch, there was no difference between cheeses from different sodium level conditions regarding the proteolysis and the texture. This work shows that it is possible to reduce sodium without affecting proteolysis and texture of Brie cheese.

2.3. Introduction

Au Québec, les consommateurs dépensent de façon hebdomadaire davantage pour les fromages (4,76 \$) comparativement au reste du Canada (région de l'Atlantique 2,93 \$, Ontario 3,96 \$, région des Prairies 4,27 \$ et Colombie-Britannique 4,38 \$) (Statistics Canada, 2001). Depuis les dernières années, les fromages de spécialités comme les fromages à pâte molle à croûte fleurie (ex. Brie et Camembert) connaissent une popularité grandissante (Spinnler & Gripon, 2004). En 2012, 43,3 % de la production de fromages de spécialité s'est faite au Québec, comparativement à 36,0 % en Ontario et 19,7 % pour les autres provinces du Canada (Canadian Dairy Information Centre, 2013b).

En 2003, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a émis des recommandations de diminution de la consommation quotidienne du sodium (Na) provenant du sel (NaCl). Il est suggéré de consommer moins de 2 g de sodium par jour par personne, ce qui équivaut à 5 g de NaCl par jour (World Health Organization & Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2003). Les bénéfices santé liés à la réduction de la consommation quotidienne du sodium sont nombreux, tels qu'une diminution de 30 % de la prévalence à l'hypertension (Joffres et al., 2007), de 8,6 % des incidents cardiovasculaires (Penz et al., 2008) et de 18 % à 23 % des dépenses associées aux maladies cardiovasculaires (MCV) (Joffres et al., 2007). Les Canadiens consomment environ 3136 mg de sodium par jour (Fischer et al., 2009), ce qui dépasse l'apport maximal tolérable (AMT) établi à 2300 mg de sodium par jour (Institute of Medicine of the National Academy of Sciences, 2005). L'AMT est alors dépassé chaque jour par environ 85 % des Canadiens (Health Canada, 2010). Suite aux recommandations émises par l'OMS, Santé Canada a proposé des cibles de réduction du sodium dans les aliments transformés dont les fromages (Health Canada, 2012). Les six catégories d'aliments transformés contribuant le plus à l'apport quotidien en sodium sont les produits de boulangerie, les viandes transformées, les légumes transformés, les soupes, les plats de pâtes et les fromages avec des proportions respectives de 14 %, 9 %, 7 %, 7 %, 6 % et 5 % (Fischer et al., 2009). Plusieurs rôles importants sont attribués au NaCl dans les fromages aux niveaux technologique, microbiologique et organoleptique (Guinee & Fox, 2004; Guinee & Sutherland, 2011). L'égouttage est complété par le salage des fromages (Kindstedt et al., 1992; Mistry & Kasperson, 1998; Schroeder et al., 1988) qui favorise la sortie du lactosérum par la synérèse du caillé (Guinee & Fox, 2004). Le NaCl permet la sélection et la régulation des populations microbiennes désirables

(Gillis, 2004) comme *Penicillium camemberti* et *Geotrichum candidum* nécessaires à l'affinage des fromages Camembert et Brie. Le NaCl confère des caractéristiques organoleptiques particulières aux fromages notamment au niveau du goût salé et de la texture (Gillis, 2004).

Pendant l'affinage des fromages à pâte molle à croûte fleurie, comme le Camembert et le Brie, la texture des fromages change et la pâte s'amollit de l'extérieur vers l'intérieur (Guinee & Fox, 2004). Les trois principaux phénomènes qui se passent pendant l'affinage sont l'action de la présure sur la caséine α_{s1} , l'action de la microflore sur la remontée du pH et l'action de la remontée du pH sur la migration du calcium vers la surface (Spinnler & Gripon, 2004). Les ferments de départ, composés d'une microflore bactérienne et fongique mixte, sont ajoutés au lait à la suite de la pasteurisation. Lorsque le lait a atteint un pH autour de 6,4, la coagulation du lait est enclenchée par l'ajout de la présure. Au démoulage, le caillé d'un fromage Camembert traditionnel a un pH de 4,6 car les ferments lactiques (lactocoques homofermentaires mésophiles) continuent l'acidification durant l'égouttage. Dans le cas d'un fromage Camembert de type stabilisé, les grains de caillé sont lavés pour réduire le lactose résiduel afin de ralentir l'acidification et ainsi voir un pH plus haut à la fin de l'étape de démoulage. Cette action particulière permet d'obtenir un fromage moins déminéralisé, ce qui stabilise davantage la structure de la pâte (Spinnler & Gripon, 2004). L'acidification par les bactéries lactiques avantage les microorganismes acidophiles qui sont des levures et des moisissures filamenteuses de surface (Spinnler & Gripon, 2004). Le salage et les autres barrières technologiques entravent partiellement la croissance microbienne incluant les microorganismes indésirables (Spinnler & Gripon, 2004). L'acidification de la pâte pendant la fabrication, ainsi que l'oxygène et l'humidité de la chambre d'affinage stimulent la croissance de la microflore à la surface, incluant *P. camemberti* et *G. candidum* (Spinnler & Gripon, 2004). Durant la première semaine d'affinage, une dense croûte feutrée et blanche se développe en surface du fromage à la suite de la croissance de *P. camemberti* et de *G. candidum* (Spinnler & Gripon, 2004). L'acide lactique provenant du métabolisme du lactose est utilisé par la microflore fongique pour sa croissance (Spinnler & Gripon, 2004). En conséquence, le pH du fromage au niveau de la surface remonte rapidement (Spinnler & Gripon, 2004). De plus, une grande quantité de CO₂ est relarguée à la suite du processus de respiration (Spinnler & Gripon, 2004). La remontée du pH en surface crée au sein du fromage un gradient de pH (pour atteindre en fin d'affinage un pH au centre autour de 6,0 et un pH à la surface autour de 7,0), une augmentation de la charge nette des caséines, des modifications

au niveau des interactions protéines-protéines et protéines-eau, ainsi qu'une migration du lactate, du calcium et du phosphate du centre vers la surface du fromage (Spinnler & Gripon, 2004). Le phosphate de calcium forme un sel insoluble lors que le pH est élevé, ce qui l'immobilise à la surface du fromage (Le Graet et al., 1983). L'hydrolyse des protéines du fromage Camembert se poursuit dans le caillé par l'action de la présure retenue dans le fromage (action sur la majorité de la caséine α_{s1}), ainsi que par les enzymes sécrétées par *P. camemberti* (action limitée en dessous de la croûte à cause de leur faible diffusion dans la pâte) (Desmazeaud et al., 1976; Spinnler & Gripon, 2004).

Bien que la réduction en sodium soit possible jusqu'à environ 30 % sans impact négatif, entre autres pour le Cheddar, le Camembert, le Gouda, le Camping, le Cottage, le Feta et le Kefalograviera (Guinee & Fox, 2004; IDF, 2014; Lindsay et al., 1982), une réduction plus importante en sodium peut affecter les propriétés physico-chimiques et texturales des fromages. La protéolyse, l'activité de l'eau et le pH augmentent dans les fromages fortement réduits en sodium tandis que la fermeté diminue, donnant aux produits finaux de mauvaises saveurs, comme de l'amertume et de l'acidité (El-Bakry, 2012). Ces résultats sont fréquemment rencontrés dans la littérature sur le Cheddar (Banks et al., 1993; Karahadian & Lindsay, 1984; Kosikowski, 1983; Mistry & Kasperson, 1998; Schroeder et al., 1988). Une faible quantité de NaCl favorise la croissance de *G. candidum* dans les fromages à croûte fleurie, ce qui, en excès, entrave le développement de *P. camemberti* (Spinnler & Gripon, 2004). Les microorganismes indésirables dans les fromages sont favorisés lorsqu'il y a trop peu de NaCl, menant à des défauts d'affinage comme dans le cas de *Rhizomucor* qui, lorsque présent en excès, donne une apparence de « poils de chat » à la surface du fromage (Spinnler & Gripon, 2004). Le salage module l'activité des enzymes exprimées par la microflore. Sans le sel, les conditions seraient plus favorables aux enzymes, accélérant le processus d'affinage et causant des problèmes de conservation (Spinnler & Gripon, 2004). La substitution partielle du NaCl avec d'autres sels, tels le chlorure de potassium (KCl), a aussi été rapportée comme une alternative intéressante dans le but de réduire le sodium dans les fromages (Aly, 1995; Ayyash et al., 2011; Demott et al., 1984; El-Bakry et al., 2011; Fitzgerald & Buckley, 1985; Iwanczak et al., 1995; Karahadian & Lindsay, 1984; Katsiari et al., 1997, 1998; Reddy & Marth, 1993). Étant similaire au sodium (Kaur et al., 2011) au niveau de l'effet inhibitoire osmotique (Guinee & Fox, 2004) et en ayant les mêmes sites de fixation au niveau des caséines (Le Graet & Brulé, 1993), le potassium (K) est un substitut de choix. La substitution partielle (50 %) par le KCl pour réduire le sodium dans les fromages a été rapportée comme étant

une réussite, entre autres pour le Cheddar (Fitzgerald & Buckley, 1985). Les fromages substitués ont obtenu des pointages similaires au fromage contrôle, lorsqu'évalués par un panel de dégustation. Cependant, des mauvaises saveurs, une instabilité microbiologique et des propriétés fonctionnelles modifiées sont des effets indésirables associés à de trop grandes substitutions avec le KCl (El-Bakry, 2012). Il a été possible de substituer de 25 % à 50 % du sodium par du potassium dans les fromages Camembert et le Gouda (Iwanczak et al., 1995). Dans ces travaux, les fromages réduits en sodium de 25 % à 50 % ont démontré les meilleures propriétés organoleptiques selon le panel de dégustation. Peu d'études se sont intéressées à quantifier l'impact de la réduction en sodium sur la texture des fromages de spécialité, comme les fromages à pâte molle à croûte fleurie. Les travaux de cette présente étude portent sur des fromages Brie fabriqués en entreprise ayant des teneurs standards et réduites en sodium par réduction nette ou par substitution au KCl. Leur composition, leur degré de protéolyse et leur profil textural ont été analysés pendant l'affinage. Le but du projet est de déterminer si les caractéristiques texturales du fromage Brie sont affectées par la réduction ou le remplacement du sodium.

2.4. Matériel & Méthodes

2.4.1. Fabrication des fromages

Des fromages Brie de type stabilisé ont été utilisés dans cette étude. Ils ont été fabriqués dans une fromagerie industrielle (Québec, Canada) qui désire que son identité et son procédé demeurent confidentiels. Chaque répétition de l'expérimentation consistait en trois saumurages expérimentaux qui ont été réalisés à partir d'un même lot afin d'obtenir des conditions salines standard (fromage contrôle; CTL), réduite en sodium par réduction nette (fromage réduit; R) et réduite en sodium par substitution partielle au KCl (fromage substitué; S) (tableau 2-1). Les différentes conditions salines ont été obtenues en contrôlant le saumurage des fromages obtenus directement de la chaîne de production, les étapes précédentes étant réalisées par l'entreprise (pasteurisation, inoculation et maturation avec les ferments, coagulation, coupage, moulage, égouttage, démoulage, affinage, emballage). Quatre répétitions de l'expérience de l'expérimentation ont été réalisées sur des lots différents. Chaque répétition comprenait 12 meules de fromage par condition saline et 1 meule non

saumurée. La meule non saumurée sert à déterminer la teneur en humidité et solides totaux afin de comparer la teneur en humidité entre les lots avant le saumurage. Les meules ont été réparties au hasard dans les 3 conditions salines étudiées.

Le salage des fromages Brie se fait par saumurage basé sur les conditions industrielles et qui ont été adaptées pour cette étude (tableau 2-1). Le fromage CTL est saumuré selon les conditions industrielles, c'est-à-dire en utilisant les mêmes concentrations en NaCl, mais dans des récipients identiques à ceux utilisés pour les autres saumures qui sont de format plus petit que les bassins industriels. Les conditions de saumurage des fromages R et S ont été préalablement optimisées lors de travaux de maîtrise effectués à l'Université Laval (Touchette, 2016). Le temps de saumurage et la composition de la saumure utilisée sont les deux facteurs modifiés pour obtenir les fromages R et S. La saumure utilisée pour la substitution était composée de seulement 80 % de la teneur en NaCl de la saumure originale mais était enrichie de KCl (6,6 % p/p) et était en état de saturation. Les conditions de saumurage du fromage S visaient une réduction de 20 % à 30 % du sodium, tout en respectant la même teneur en ions dans chaque condition, c'est-à-dire que la molarité totale du fromage substitué (molarité en Na additionnée à la molarité en K) avait pour cible la même molarité que celle du fromage CTL (molarité en Na uniquement). Ceci avait pour but d'éviter d'obtenir des effets associés à la teneur en ions plutôt qu'à leur nature.

Tableau 2-1. Conditions de saumurage des fromages Brie expérimentaux.¹

Fromages	Composition saline des saumures (p/p)	Temps de saumurage (min)	Condition saline obtenue
CTL	26,0 % NaCl	70	100 % de Na
R	26,0 % NaCl	20	Réduite de ~23 % en Na
S	20,8 % NaCl et 6,6 % KCl	50	Réduite de ~23 % en Na

¹ Basées sur les travaux de Touchette (2016). CTL : fromage contrôle à condition saline standard; R : fromage à condition saline réduite en Na par réduction nette; S : fromage à condition saline réduite en sodium par substitution au KCl.

Des saumures expérimentales préparées dans des bassins sans agitation à petite échelle ont été préparées et utilisées une seule fois. Les saumures ont été préparées à l'aide des ingrédients suivants: eau potable, NaCl granulé haut de gamme (Windsor Salt, Pointe-Claire, Québec, Canada), CaCl₂ 32 % p/v (FBC Industries inc., Schaumburg, IL États-Unis), acide lactique 80 % (FCC solution, Les Produits Chimiques Amplex Ltée, Pointe-Claire, Québec, Canada) et KCl de grade alimentaire USP/FCC (Thermo Fisher Scientific, Waltham, Massachusetts, États-Unis). Les saumures contenaient 1000 ppm de chlorure de calcium (CaCl₂) et un pH ajusté à $5,1 \pm 0,1$ avec de l'acide lactique (Touchette, 2016). Les saumures ont été préparées 48 heures avant le saumurage afin que les sels se solubilisent (avec brassage quotidien). Suite à leur préparation, les saumures ont été entreposées dans une salle à température contrôlée à 12 ± 2 °C afin que les saumures s'équilibrent à la température de saumurage. L'ajustement du pH a été effectué 24 heures après la préparation des saumures.

Le saumurage des fromages expérimentaux a été effectué immédiatement après le démoulage. Les meules ont été immergées dans les saumures et ont été retournées à la moitié du temps total de saumurage, afin de favoriser la prise en sel uniforme sur toutes les surfaces. Les fromages saumurés ont ensuite été placés sur des claies et transportés dans des chambres d'affinage à température et à humidité relative contrôlées et ont été retournés à deux reprises. Avant d'être emballés, les fromages ont été mis à sécher pendant 2 heures dans des conditions contrôlées. Les fromages ont ensuite été emballés au jour 10 ± 1 (J0 étant la journée où les fromages ont été produits; J1 étant la journée où les fromages ont été saumurés) puis envoyés à l'Université Laval en préservant la chaîne de froid. Suite à leur réception, les fromages ont été affinés à 4 °C durant 42 jours. Dans cette étude, la protéolyse et la texture ont été mesurées à J14 (début de la distribution des fromages à partir de l'usine de production), J21, J28 et J42. La composition des fromages a été analysée à $J28 \pm 2$ (figure 2-1).

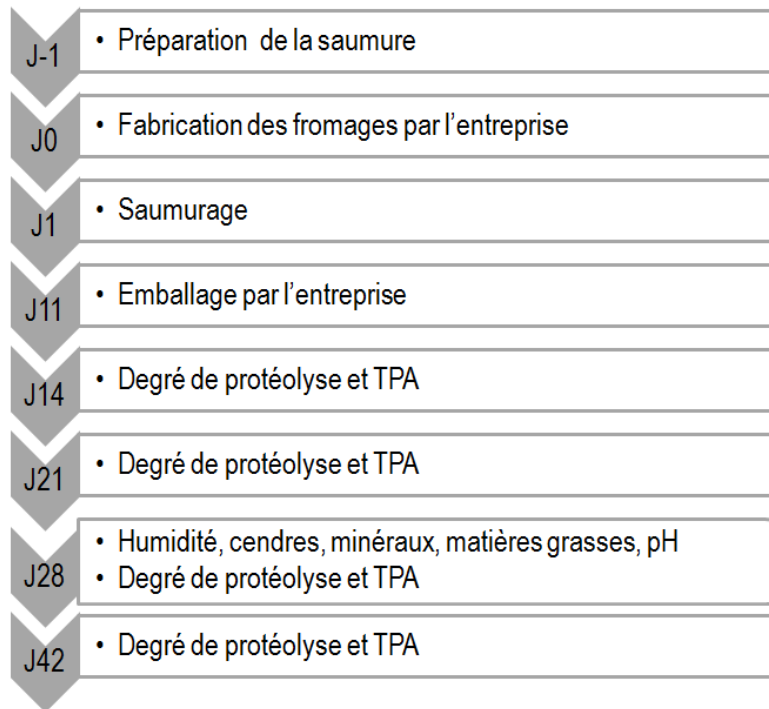


Figure 2-1. Représentation schématique des temps d'analyse des fromages Brie expérimentaux pendant l'affinage.

2.4.2. Composition des fromages

La composition des fromages a été analysée une fois par répétition à J28 de l'affinage. Les teneurs en humidité (AOAC, 2008), en protéines (ISO/IDF, 2008), en cendres (AOAC, 2000) et en matières grasses (ISO/IDF, 2004) ont été déterminées. Le contenu en minéraux (sodium, potassium, calcium et phosphore) (St-Gelais et al., 1992)), le pH de la croûte et du centre des fromages (Touchette, 2016) ont aussi été étudiés. Pour les analyses de composition, les échantillons de fromages ont été prélevés dans le centre d'une meule intacte (AOAC, 2005) puis homogénéisés à l'aide d'un moulin à café à 4 °C. Les teneurs en humidité et en matière grasse ont été analysées sur des fromages frais conservés à 4 °C. La teneur en cendres, le dosage des minéraux ainsi que le pH de la croûte et du centre des fromages ont été analysés sur des échantillons de fromage (1/4 de meule) ayant été placés sous vide et congelés à -20 °C. La composition du fromage commercial, déterminée autour du J25 par l'entreprise, a été comparée avec le fromage expérimental contrôle afin de s'assurer que les paramètres de composition étaient semblables.

La réduction en sodium a été calculée selon la quantité de sodium des fromages R ou S par rapport au fromage CTL d'une même répétition basée sur les équations suivantes :

$$\left(\left(\frac{Na_{CTL} - Na_{R \text{ ou } S}}{Na_{CTL}} \right) \times 100 \right) = \% \text{ de réduction du fromage R ou S} \quad (1)$$

Na_{CTL} : Teneur en sodium du fromage CTL (mg/100 g de fromage)

Na_R : Teneur en sodium du fromage R (mg/100 g de fromage)

Na_S : Teneur en sodium du fromage S (mg/100 g de fromage)

2.4.3. Degré de protéolyse

Le degré de protéolyse dans les fromages a été déterminé par le fractionnement brut dans l'eau et dans l'acide trichloroacétique (TCA) des composés azotés du fromage conservé à 4 °C (IDF, 1991a). La teneur en azote des différentes fractions (totale, soluble dans l'eau et dans le TCA) a été déterminée par la méthode Kjeldhal (ISO/IDF, 2008). Le contenu en azote total (NT) comprend tous les composés azotés protéiques et non protéiques du fromage. Le fractionnement fait avec de l'eau permet de déterminer la teneur en azote provenant des acides aminés, des peptides et des protéines solubles dans la phase aqueuse (NSE) (Ardö, 1999). Les petits peptides de 2 à 20 résidus (moins de 3000 Dalton), ainsi que les acides aminés, libérés par l'action des enzymes de la microflore (O'Keeffe et al., 1978), sont présents dans la fraction soluble dans le TCA (NSTCA) (Ardö, 1999). Le calcul du degré de protéolyse se fait comme suit :

$$\left(\frac{NS}{NT} \right) \times 100 = \text{Degré de protéolyse (\%)} \quad (2)$$

NS: azote soluble (g/100g de fromage) à pH 4,6 (NS pH 4,6), dans l'eau (NSE) ou dans le TCA (NSTCA)

NT: azote total (g/100g de fromage)

2.4.4. Analyse du profil textural

L'analyse du profil textural a été effectuée avec un texturomètre TA-XT₂ (Texture Technologies Corp, Hamilton, Massachusetts, États-Unis) basée sur la méthode officielle (IDF, 1991b). La préparation des échantillons de fromage frais (conservé à 4 °C) a été effectuée à 4 °C. Le centre de la meule a été prélevé à l'aide d'un emporte-pièce circulaire de 9,9 cm de diamètre. À partir de ce morceau de fromage, les échantillons ont été découpés à l'aide d'un emporte-pièce de style « perce-bouchon » afin d'obtenir des cylindres ayant un diamètre de 1 cm et une hauteur de 1 cm (figure 2-2). Les cylindres de fromage ont ensuite été placés dans une boîte de Pétri scellée par du parafilm pendant 30 minutes à la température de la pièce (environ 20 °C).

Chaque cylindre est comprimé à deux reprises à 50 % de leur hauteur originale à l'aide d'une géométrie en acrylique de forme cylindrique (TA-11, 25 mm de diamètre et 35 mm de hauteur, Texture Technologies Corp, Hamilton, Massachusetts, États-Unis). La vitesse de compression est de 1 mm s⁻¹ (60 mm/min). L'analyse a été répétée au minimum à 11 reprises et les 9 analyses les plus proches ont été sélectionnées. La déformation de 50 % permet d'obtenir de très bons résultats sans trop déformer le cylindre pour ne pas détruire ni déformer de manière permanente l'échantillon. Une plus faible déformation surévalue les paramètres de texture. Le logiciel « *Texture Exponent Software* » (Version 6.1.7.0, Stable Micro System, Texture Technologies Corp., Hamilton, Massachusetts, États-Unis) permet de déterminer différents paramètres de texture. Les paramètres qui ont été étudiés pour le fromage Brie, qui est un aliment semi-solide (O'Callaghan & Guinee, 2004), ont été la fermeté, la cohésion, la capacité gommante, la résilience et l'adhésion. Le calcul des paramètres et leur définition sont présentés à la figure 1-2 et au tableau 1-1 (à la section 1.4.3 du chapitre 1). La fracturabilité (force nécessaire de la première mastication entre les molaires qui brisent un aliment, en Newton) n'a pas été étudiée, car elle n'a pas pu être mesurée dans les conditions utilisées.

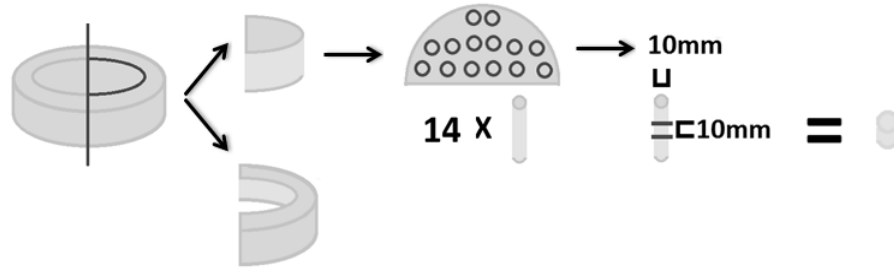


Figure 2-2. Préparation des cylindres de fromage Brie pour l'analyse du profil textural. Une moitié d'une meule de 870 g est suffisante pour l'analyse. Le centre du fromage est prélevé à l'aide d'un emporte-pièce. Quatorze cylindres ont été prélevés dans le centre du fromage. Chaque cylindre mesure 1 cm de diamètre par 1 cm de hauteur. L'autre moitié de la meule de fromage est utilisée pour d'autres analyses, comme pour la détermination du degré de protéolyse (non illustrée). Les éléments de la figure ne sont pas à l'échelle.

2.4.5. Analyses statistiques

L'analyse statistique de la composition (J28) a été effectuée par le logiciel SAS (version 9,4 de SAS, SAS Institute, Cary, Caroline du Nord, États-Unis) en réalisant un test d'ANOVA en blocs complets aléatoires et des contrastes. Les analyses statistiques du degré de protéolyse et des paramètres de texture en fonction du temps d'affinage ont été effectuées par le logiciel SAS (version 9,4) en réalisant un test d'ANOVA en blocs complets aléatoires avec mesures répétées (temps d'affinage) et des contrastes ont été effectués pour les comparaisons. Les corrélations ont été effectuées par le logiciel SAS (version 9,4) en réalisant un test de Pearson avec les paramètres du degré de protéolyse et de texture pendant l'affinage. Le seuil sélectionné du niveau de signification est de $p < 0,05$.

2.5. Résultats et discussion

2.5.1. Analyses physico-chimiques des fromages

Le fromage Brie utilisé, lorsque produit commercialement (approximativement à J25) est composé de 47,6 % d'humidité, 18,9 % de protéines, 28,5 % de matières grasses, 3,1 % de cendres, 510 mg de

calcium par 100 g de fromage et 610 mg de sodium par 100 g de fromage en moyenne (tableau 2-2). Le fromage CTL, dont les analyses ont été faites à J28, a une composition plutôt similaire au fromage commercial (tableau 2-2). Le fromage CTL contenait un peu moins de sodium (529 mg) que la moyenne obtenue pour le fromage commercial par l'entreprise. Cette observation pourrait s'expliquer par le système de saumuration industriel qui permet d'immerger complètement les meules de fromage dans la saumure, tandis que le système expérimental ne le permettait pas (les meules devaient être retournées à mi-temps). Également, la saumure industrielle était agitée pendant le saumuration, alors que les saumures expérimentales étaient statiques, ce qui pourrait influencer la prise en sel des meules. En effet, pendant la prise en NaCl, la saumure en périphérie des meules de fromage s'appauvrit en NaCl, ce qui est contré par l'agitation des saumures. De plus, la méthode de dosage du sodium utilisée pour le fromage commercial n'est pas connue. Si la méthode est différente de celle utilisée dans cette étude, cela pourrait induire une variabilité. Cela pourrait expliquer la différence d'environ 50 mg de sodium par 100 g de fromage entre les valeurs pour les fromages commerciaux et CTL.

La composition des fromages CTL, R et S n'est pas différente au niveau de la teneur en humidité ($p = 0,8398$), en protéines ($p = 0,8932$), en matières grasses ($p = 0,9509$) et en cendres ($p = 0,0562$) (tableau 2-2). Le contenu en cendres n'est pas significativement différent entre les fromages, mais le fromage R a tendance à en avoir moins que les fromages CTL et S. La composition des fromages sur poids sec démontre que l'humidité n'a pas influencé les autres paramètres de composition puisque les conclusions des comparaisons entre les fromages restent les mêmes (tableau 2-4 à l'annexe 2-1 pour la composition sur poids sec). Les teneurs en calcium ($p = 0,1767$) et en phosphore ($p = 0,2104$) ne sont pas différentes entre les fromages CTL, R et S. Les contenus en sodium ($p = 0,0026$) et en potassium ($p = 0,0002$) sont significativement différents entre les fromages expérimentaux. Les fromages CTL et R ont une teneur en potassium similaire ($p = 0,4108$) tandis que le contenu en potassium du fromage S est significativement plus élevé ($p < 0,01$), ce qui est attribué aux conditions de saumuration (tableau 2-2). Les teneurs en sodium des fromages R et S étaient similaires ($p = 0,2682$), soit en moyenne 405 mg de sodium par 100 g de fromage, ce qui est moindre que celle du fromage CTL avec 529 mg par 100 g de fromage ($p < 0,01$) (figure 2-3). Ceci était attendu puisque les conditions de saumuration visaient une réduction en sodium. Une diminution moyenne de 23,4 % de sodium a été obtenue dans les fromages R et S comparativement au CTL.

Tableau 2-2. Composition et paramètres physico-chimiques du fromage Brie commercial (J25) et des fromages Brie expérimentaux (J28 ± 2).

Paramètres physico-chimiques	Commercial ¹	CTL ²	R ²	S ²
Humidité (g/100 g fromage)	47,6	47,3 ± 0,2 ^a	47,8 ± 2,7 ^a	47,4 ± 0,7 ^a
Protéines (g/100 g fromage)	18,9	18,2 ± 0,5 ^a	18,1 ± 1,0 ^a	17,6 ± 1,2 ^a
Matières grasses (g/100 g fromage)	28,5	30,3 ± 0,9 ^a	30,2 ± 1,6 ^a	30,2 ± 0,8 ^a
Cendres (g/100 g fromage)	3,1	3,0 ± 0,2 ^a	2,7 ± 0,1 ^a	3,0 ± 0,2 ^a
Calcium (mg/ 100 g fromage)	510	471 ± 34 ^a	502 ± 24 ^a	481 ± 11 ^a
Phosphore (mg/ 100 g fromage)	ND	323 ± 20 ^a	341 ± 13 ^a	331 ± 6 ^a
Potassium (mg/ 100 g fromage)	ND	80 ± 7 ^b	98 ± 25 ^b	258 ± 41 ^a
Sodium (mg/ 100 g fromage)	611	529 ± 36 ^a	390 ± 32 ^b	419 ± 57 ^b
pH de la croûte	ND	6,2 ± 0,3 ^a	6,2 ± 0,4 ^a	6,2 ± 0,2 ^a
pH du centre	ND	5,4 ± 0,4 ^a	5,5 ± 0,5 ^a	5,4 ± 0,4 ^a

¹ Données moyennes fournies par l'entreprise. ² Moyenne ± écart-type de 4 répétitions (n = 4). Les lettres différentes sur une même ligne indiquent des différences significatives (p < 0.05). CTL : fromage contrôle à condition saline standard ; R : fromage à condition saline réduite en Na par réduction nette ; S : fromage à condition saline réduite en sodium par substitution au KCl; ND: donnée non déterminée au moment de l'étude.

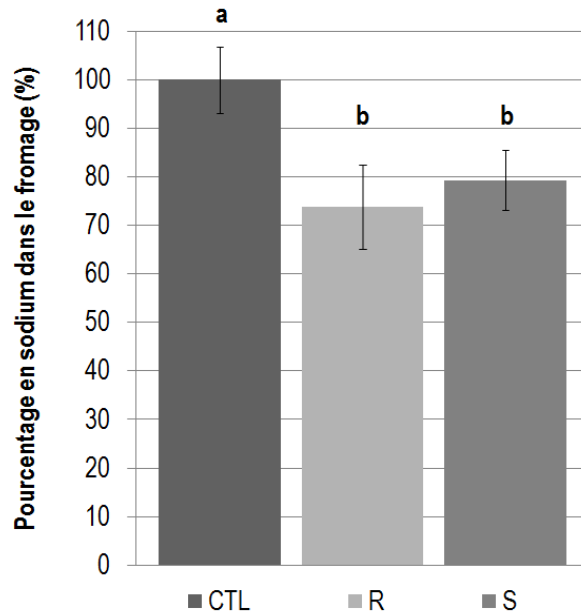


Figure 2-3. Pourcentage en Na (%) du fromage Brie expérimental CTL en comparaison avec les fromages Brie expérimentaux R et S (J28).

Moyenne \pm écart-type de 4 répétitions (n = 4). Les lettres différentes indiquent des différences significatives ($p < 0,05$). ■ CTL : fromage contrôle à condition saline standard; ■ R : fromage à condition saline réduite en Na par réduction nette; ■ S : fromage à condition saline réduite en sodium par substitution au KCl.

2.5.2. Impact de l'affinage sur le degré de protéolyse et la texture des fromages

Les changements de texture durant l'affinage des fromages Brie et Camembert sont entre autres attribués à la protéolyse qui dégrade le réseau de protéines et cause une diminution de l'activité de l'eau et une augmentation du pH (Sousa et al., 2001).

2.5.2.1. Degré de protéolyse

Le degré de protéolyse est un indice de la proportion des protéines hydrolysées en référence aux protéines totales présentes. Les teneurs en azote total (NT), en azote soluble dans l'eau (NSE) et en azote soluble dans le TCA (NSTCA) ont été déterminées à chaque temps d'affinage échantillonnés lors de l'étude (tableaux 2-5, 2-6 et 2-7 à l'annexe 2-2), pour chaque fromage expérimental, afin de

calculer le degré de protéolyse (NSE/NT et NSTCA/NT). Les valeurs moyennes du degré de protéolyse (NSE/NT) des fromages Brie expérimentaux pendant l'affinage sont de 22,6 % (J14), 29,6 % (J21), 34,2 % (J28) et 39,4 % (J42) ainsi que de 10,6 % (J14), 15,4 % (J21), 18,1 % (J28) et 17,9 % (J42) (NSTCA/NT) (figure 2-4). Le degré de protéolyse des fromages expérimentaux a augmenté significativement ($p < 0,001$) en fonction du temps d'affinage, en accord avec la littérature (Lenoir, 1963). Les 15 premiers jours sont ceux où la protéolyse est très active suivi d'une diminution progressive du taux d'accroissement de l'azote soluble (Lenoir, 1963). Les fromages à pâte molle à croûte fleurie dont la pâte est dite stabilisée s'affinent moins rapidement que les fromages traditionnels (Spinnler & Gripon, 2004). La protéolyse étudiée pendant l'affinage du fromage Camembert traditionnel est généralement plus élevée que pour les fromages Brie expérimentaux (Schlessler et al., 1992; Vassal et al., 1986). Les travaux de Lenoir (1963) ont déterminé la protéolyse (NS pH 4,6/NT) au niveau de la surface et du centre du fromage Camembert traditionnel en fonction du temps d'affinage. Les valeurs du degré de protéolyse (NS pH 4,6/NT) à J20 étaient, pour la surface et le centre du Camembert, respectivement de 32,3 % et 20,0 % ainsi que de 34,6 % et 30,0 % à J30 (Lenoir, 1963). La protéolyse du Camembert obtenue dans différentes études (Guizani et al., 2002; Kfoury et al., 1989; Lenoir, 1963; Lesage et al., 1992; Lesage et al., 1993) était moins élevée comparativement aux fromages Brie expérimentaux de cette étude bien que les fromages Camembert soient traditionnels. Cela peut être dû à l'extraction d'azote soluble qui est plus grande avec de l'eau qu'à pH acide, ce qui expliquerait le plus grand contenu en NSTCA pour les fromages expérimentaux de cette étude. La plupart des auteurs ayant étudié la protéolyse des fromages Camembert et Brie ont calculé le degré de protéolyse avec les valeurs d'azote soluble à pH 4,6 (NS pH 4,6) (Guizani et al., 2002; Iwanczak et al., 1995; Kfoury et al., 1989; Lenoir, 1963; Lesage et al., 1992; Lesage et al., 1993; Schlessler et al., 1992; Vassal et al., 1986) ce qui n'est pas le cas dans cette étude (extraction à l'eau). Il a été choisi d'utiliser la fraction soluble dans l'eau pour calculer le degré de protéolyse afin de comparer les résultats avec les travaux effectués dans notre équipe portant sur une gamme de fromages dont le pH ne variait pas systématiquement dans le temps (Fang, 2015). Puisque le pH du fromage Brie varie durant l'affinage, la détermination du degré de protéolyse par l'extraction de l'azote à l'eau peut avoir été légèrement biaisée (surestimation) (Sousa et al., 2001) car certaines fractions insolubles à pH 4,6 pourraient être partiellement solubles à pH plus élevé. Certaines études présentent aussi un degré de protéolyse calculé avec les valeurs d'azote soluble dans le TCA. Les valeurs sont inférieures au degré de protéolyse calculé avec les

valeurs de NSE ou NS pH 4,6 puisque la fraction NSTCA ne contient pas les protéines et les grands peptides (supérieurs à 20 résidus).

Molander et coll. (1990) ont aussi évalué la protéolyse durant l'affinage. Cependant, les résultats du degré de protéolyse démontrés dans l'article ont seulement été utilisés pour réaliser des corrélations donc aucune donnée n'est disponible pour comparer avec les résultats de cette étude. Ils ont démontré que des corrélations sont très significatives entre la fermeté ainsi que le degré de protéolyse et encore plus significatives entre l'âge des fromages et le pH.

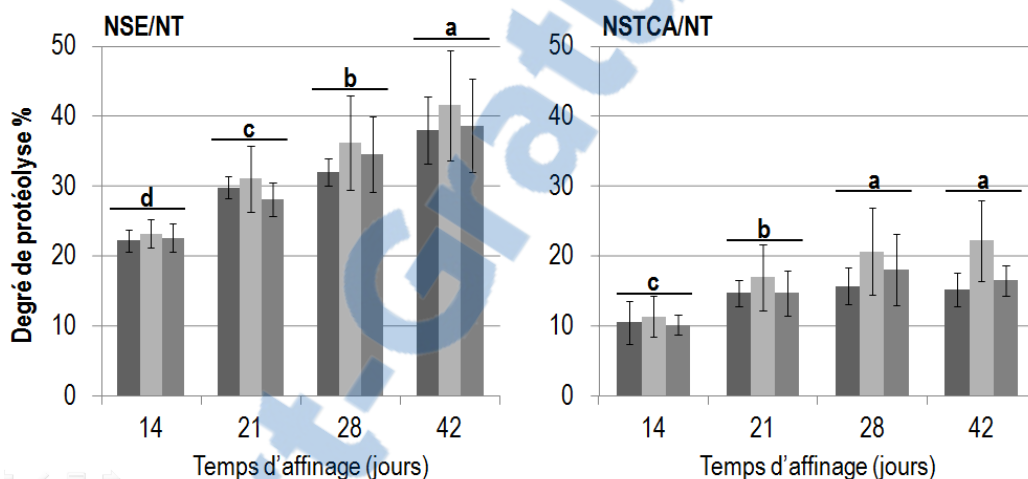


Figure 2-4. Degré de protéolyse (NSE/NT et NSTCA/NT) des fromages Brie expérimentaux pendant l'affinage.

Moyenne \pm écart-type de 4 répétitions (n = 4). Les différentes lettres indiquent des différences significatives ($p < 0,05$). NSE: azote soluble dans l'eau; NT: azote total; NSTCA: azote soluble dans l'acide trichloroacétique. ■ CTL : fromage contrôle à condition saline standard; ■ R : fromage à condition saline réduite en Na par réduction nette; ■ S : fromage à condition saline réduite en sodium par substitution au KCl.

La réduction en sodium par réduction nette et par substitution au KCl, selon les conditions expérimentales de cette étude, n'a pas eu d'impact sur le degré de protéolyse du fromage Brie ($p > 0,05$) (figure 2-4), ce qui confirme ce qui avait été obtenu dans une autre étude sur l'évaluation de l'ajout du potassium dans les fromages Camembert, Camping, Tilsit et Gouda (Iwanczak et al., 1995). Dans cette dernière étude, à J10, les fromages contrôle, réduit en sodium (50 % du temps de

saumurage) et réduit en sodium par substitution au KCl n'ont pas démontré de différences significatives au niveau de leur degré de protéolyse (NS pH 4,6/NT) présentant respectivement des valeurs de 18,93 %, 18,05 % et 19,30 %. Ces valeurs sont inférieures à celles obtenues dans cette étude, car les mesures ont été effectuées plus tôt dans l'affinage.

2.5.2.2. pH

La dégradation des protéines dans les fromages à pâte molle à croûte fleurie, comme le Brie et le Camembert, se produit même à 4 °C durant l'entreposage. Les caractéristiques organoleptiques telles que l'aspect général, la texture, la consistance de la pâte en bouche et les saveurs du fromage Camembert sont influencées par la dégradation des protéines (Leclercq-Perlat et al., 2004; Lenoir, 1963; Schlessler et al., 1992). Pendant sa croissance, la microflore fongique exprime des protéases sous la croûte du fromage qui vont hydrolyser les protéines localement puisque leur capacité de diffusion dans la pâte est limitée. Ainsi, la vitesse de remontée de pH et du degré de protéolyse corrèle avec l'activité de la microflore de surface. Les valeurs de pH de la croûte des fromages expérimentaux à J28 sont similaires entre les fromages CTL, R et S ($p = 0,8159$) (tableau 2-2), ce qui indique que la remontée du pH a atteint le même plateau de pH entre les fromages à conditions salines différentes. Les valeurs de pH du centre du fromage à J28 sont aussi similaires entre les fromages expérimentaux ($p = 0,5222$). Les valeurs de pH du centre (moyenne de $5,44 \pm 0,39$) sont inférieures aux valeurs de pH de la surface (moyenne de $6,19 \pm 0,27$), ce qui est attendu puisque l'acide lactique est d'abord consommé à la surface pour ensuite migrer du centre vers l'extérieur de la pâte pendant l'affinage, ce qui cause un gradient de pH à l'intérieur du fromage Camembert. Les travaux de Lenoir (1963) ont aussi décrit l'évolution du pH pendant l'affinage du fromage. Pour l'intervalle des J[24-27], le pH du centre était de 5,43, comme celui des fromages expérimentaux, et de la surface de 6,83, ce qui est plus élevé que celui des fromages expérimentaux. Une étude sur les changements microbiologiques, physico-chimiques et biochimiques durant l'affinage du fromage Camembert traditionnel a démontré à J30 des valeurs de pH légèrement supérieures aux valeurs de pH des fromages expérimentaux pour le centre ($5,60 \pm 0,14$) et la surface ($6,38 \pm 0,11$) du fromage (Guizani et al., 2002). Les fromages stabilisés ont un plus grand pouvoir tampon que les fromages traditionnels, expliquant une moins grande vitesse de remontée de pH. On remarque ce phénomène en comparant les valeurs de pH du centre et de la croûte qui sont plus près de la neutralité pour les

fromages traditionnels à J30 (pH de 6,50 et 7,03 selon les travaux de Vassal et Gripon (1984) ainsi que de 5,89 et 7,67 selon les travaux de Leclercq-Perlat et coll. (2004)). Une étude sur le Camembert fait exception avec des pH moins élevés à J28 pour le centre (4,86) et la surface (6,00), mais il n'est pas clair si le fromage à l'étude était un Camembert de type traditionnel ou stabilisé (Boutrou et al., 1999).

2.5.2.3. *Texture*

La texture des fromages Brie expérimentaux a été déterminée aux jours 14, 21, 28 et 42 par l'analyse du profil textural suite à une double compression (tableau 2-3, figure 2-5 et tableau 2-8 à l'annexe 2-3). Les paramètres de texture des fromages Brie expérimentaux n'ont pas été influencés par la réduction en sodium. L'affinage a eu un impact significatif ($p < 0,01$) sur les paramètres de texture à l'étude (fermeté, cohésion, résilience et adhésion) (figure 2-5) sauf sur la capacité gommante (paramètre décrivant la force nécessaire pour avaler un aliment semi-solide) qui est stable en fonction du temps d'affinage ($p = 0,2352$) (tableau 2-8 à l'annexe 2-3). Bien que les analyses statistiques démontrent une différence significative entre les valeurs de fermeté des différents jours d'affinage, la fermeté évolue peu en fonction de l'affinage lorsqu'on considère la variabilité des échantillons (figure 2-5 A). Les fromages des répétitions 3 et 4 aux jours 28 et 42 n'ont pas pu être mesurés au texturomètre à cause de leur texture trop molle et collante rendant la préparation des cylindres de fromage impossible. Des analyses statistiques ont permis de comparer la texture aux jours 14 et 21 des fromages des répétitions 1 et 2 aux répétitions 3 et 4 (résultats non présentés). Les fromages des répétitions 3 et 4 sont moins fermes et plus cohésifs que ceux des répétitions 1 et 2. Des analyses statistiques supplémentaires sur la composition ont permis de comparer les fromages des répétitions 1 et 2 avec ceux des répétitions 3 et 4 (résultats non présentés) pour essayer de comprendre pourquoi les fromages des répétitions 3 et 4 étaient moins fermes et plus cohésifs. Des différences ont été démontrées entre les groupes de répétitions pour tous les paramètres de composition sauf pour la teneur en cendres et le dosage des minéraux. Comparativement aux fromages des répétitions 1 et 2, les fromages des répétitions 3 et 4, à J28, ont une plus grande teneur en humidité, une plus grande teneur en azote dans la phase soluble (NSE et NSTCA), un plus grand degré de protéolyse ainsi que des valeurs de pH du centre et de la croûte plus élevées. La différence d'humidité des lots peut être expliquée par différentes hypothèses. Les

fromages des répétitions 3 et 4 ont été emballés à J10 tandis que les fromages des répétitions 1 et 2 ont été emballés respectivement aux jours 11 et 12. Une étude sur les conditions atmosphériques d'affinage du Camembert a démontré la perte de masse du fromage en fonction du temps d'affinage (Picque et al., 2006). La perte de masse du fromage Camembert est attribuée à des phénomènes physiques et biologiques tels que l'évaporation de l'eau et le relâchement de CO₂ par la microflore d'affinage (Hélias et al., 2007). Entre les jours 10 et 12 pour un fromage affiné dans une atmosphère continuellement renouvelée, le fromage Camembert perd environ 1,0 % de sa masse à chaque jour. L'emballage des fromages à J10 au lieu du J11 ou du J12 pourrait peut-être expliquer la plus grande teneur en humidité des fromages des répétitions 3 et 4. Une étude sur différents emballages a démontré que la cinétique d'affinage des fromages Camembert peut être accélérée par les emballages qui empêchent les pertes d'eau (Picque et al., 2010). Les fromages emballés à J10 étant davantage humides, plus d'humidité sera présente dans l'emballage. Selon Leclercq-Perlat et coll. (2015), la pâte sous la croûte du fromage se liquéfie lorsque l'humidité relative est plus élevée. L'affinage accéléré entraîne une remontée du pH plus rapide, ce qui affecte directement la texture (Vassal et al., 1986). Une étude sur l'influence du pH sur la texture a démontré que les variations de pH ont un très grand impact sur la texture car avec ou sans la microflore, la texture change en fonction du pH (Vassal et al., 1986).

La figure 2-5 présente les paramètres de texture pour lesquels l'affinage a eu un effet significatif ($p < 0,01$). Les valeurs de fermeté (qui montrent une variabilité considérable) diminuent entre les jours 14 et 21, pour ensuite augmenter à J28 et diminuer à J42. L'impact de l'exclusion des répétitions 3 et 4 sur la variabilité des paramètres de texture est illustré par les paramètres E-F-G-H de la figure 2-5 ($n = 2$). Il n'y a pas eu de différences de texture entre les fromages expérimentaux des répétitions 1 et 2 ($p > 0,05$). L'effet de l'affinage est encore significatif pour la fermeté ($p = 0,0131$), la cohésion ($p = 0,0036$) et l'adhésion ($p = 0,0041$) sauf pour la résilience ($p = 0,0511$). La capacité gommante n'est toujours pas affectée par la réduction en sodium ($p = 0,3681$) ni par l'affinage ($p = 0,7523$) en analysant les répétitions 1 et 2. Les fromages des répétitions 1 et 2 sont un peu plus fermes (figure 2-5 E), augmentant légèrement la moyenne en diminuant la variabilité des valeurs aux jours 14 et 21 ainsi qu'en donnant une allure à la courbe plutôt stable et ayant tendance à diminuer à J42. C'est également ce qui a été décrit par Champagne et coll. (2003), ainsi que Schlessner et coll. (1992) (les valeurs plus élevées étant expliquées par la variation au niveau des

paramètres utilisés tels que le pourcentage de déformation, la vitesse de compression, la dimension et la température des cylindres de fromages).

La variabilité entre les répétitions semble avoir affecté principalement l'analyse de la fermeté pendant l'affinage. En effet, pour la cohésion, la résilience et l'adhésion, l'analyse des répétitions 1 et 2 seulement diminue la variabilité des valeurs aux jours 14 et 21, mais ne change pas l'allure des courbes (figure 2-5 F, G, H). La cohésion, décrite comme le degré de liaison entre les particules de l'aliment, est plutôt stable entre les jours 14 et 28 et augmente à la fin de la période d'affinage étudiée (figure 2-5 B), ce qui peut expliquer pourquoi il était plus difficile de prélever les cylindres de fromages à ces jours d'affinage. La résilience est plutôt stable entre les jours 14 et 28 et tend à diminuer à J42 (figure 2-5 C). L'adhésion des fromages expérimentaux augmente en fonction de l'affinage (figure 2-5 D), ce qui a aussi été observé lors des manipulations (les fromages collaient davantage aux surfaces de l'instrument et à la géométrie).

Les phénomènes simultanés de protéolyse et de variations de pH provoquent l'amollissement caractéristique de l'extérieur vers l'intérieur du fromage Camembert (figure 1-1 à la section 1.4.3 du chapitre 1) (Guinee & Fox, 2004). Un débalancement au niveau des caractéristiques physico-chimiques ainsi qu'au niveau de la microflore pourrait affecter la quantité d'enzymes produite et la vitesse de consommation du lactate, affectant alors la protéolyse et l'augmentation du pH et donc conséquemment la texture du fromage. Cependant, comme discuté précédemment, la réduction en sodium selon les conditions expérimentales de cette étude n'a pas affecté la composition globale, la protéolyse ni même la texture des fromages Brie expérimentaux. Ceci est aussi reflété, dans une autre étude, par la description sensorielle des fromages Camembert réduits en sodium par réduction nette et par substitution au KCl par un panel de dégustation entraîné, où aucune différence significative n'avait été démontrée entre les fromages au niveau des saveurs, de la fermeté sensorielle, de la visibilité des trous dans la pâte et de l'apparence de croûte (Iwanczak et al., 1995). L'évaluation de la texture des fromages Brie et Camembert peut s'effectuer par des méthodes sensorielles et instrumentales. La méthode sensorielle implique généralement la participation d'un panel de dégustation entraîné qui décrit les différents aspects du fromage au niveau des paramètres de texture surtout la fermeté, les saveurs et autres caractéristiques du fromage. La texture est mesurée par la compression uniaxiale et la pénétrométrie ainsi que par

l'analyse du profil textural (TPA pour « *texture profile analysis* » en anglais). Bien que la TPA soit une méthode empirique et que les résultats dépendent des paramètres utilisés (vitesse de compression et pourcentage de déformation), il s'agit d'une méthode rapide et qui, en conditions identiques, permet de comparer le comportement des aliments sous l'action d'une double compression successive visant à imiter partiellement la mastication (Hennequin & Hardy, 1993). Les travaux de Drake et coll. (1999) sur la détermination de la texture de différentes variétés de fromage ont démontré que la TPA est un meilleur outil de prédiction de la texture perçue en bouche que les mesures rhéologiques qui déterminent plutôt le type de réseau ainsi que les changements structuraux d'un réseau dans une matrice alimentaire.

La seule autre étude décrivant la texture du fromage Camembert pendant l'affinage par la TPA aux conditions particulières de cette étude (cylindre de 10 mm de diamètre et de 10 mm de hauteur, 50 % de déformation et vitesse de 1 mm.s⁻¹) a été réalisée dans nos laboratoires par Fang et coll. (2016a). La fermeté du Camembert était de $2,4 \pm 0,3$ N, ce qui est presque deux fois plus élevé que pour les fromages Brie expérimentaux de cette étude ([1,1-1,7 N]) (figure 2-5 A, tableau 2-8 à l'annexe 2-3). Cependant, le Camembert a été analysé 30 ± 7 jours avant sa date d'expiration, ce qui ne donne pas exactement l'âge du fromage. De plus, le fromage Camembert contient plus de matières grasses et d'humidité que les fromages Brie expérimentaux de cette étude. La cohésion du Camembert était de $0,39 \pm 0,02$ (sans dimension), ce qui est inférieur à la cohésion du Brie de cette étude. Le Camembert a démontré une adhésion similaire aux fromages Brie expérimentaux avec une valeur de $-0,21 \pm 0,10$ N*s. Bien que les valeurs de fermeté, de cohésion et d'adhésion diffèrent un peu, la texture du Camembert et du Brie expérimental semble assez similaire, comparativement avec des fromages de d'autres variétés tels que le Cheddar jeune, le Cheddar vieilli et le Mozzarella (Fang et al., 2016a).

Une étude sur les fromages français (15 variétés dont le Brie de Meaux et le Camembert) a classé en trois groupes les différents fromages selon leur similarité chimique, mécanique et sensorielle (Antoniou et al., 2000). Le Camembert et le Brie de Meaux, dont l'âge n'a pas été mentionné, ont été classés dans le même groupe (comprenant aussi les fromages le Pont-l'Évêque, le Reblochon et le Saint Nectaire). Des cylindres de fromage (21 mm de hauteur et 21 mm de largeur préparés à 4 °C et tempérés 30 minutes à 20 °C (n = 4)) ont été soumis à une TPA dont la double compression a

été réalisée à 50 mm*min⁻¹ (environ 0,8 mm/s) pour une déformation de 80 % par une sonde plate de 36 mm de diamètre lubrifiée avec de l'huile végétale (pour empêcher le fromage de coller). La fermeté moyenne du groupe de fromage comprenant le Brie était de 15,1 N, ce qui est au moins 10 fois plus élevé que les fromages expérimentaux ([1,1-1,7 N]) (figure 2-5 A, tableau 2-8 à l'annexe 2-3). Ceci peut être expliqué par le plus grand pourcentage de déformation (80 % vs 50 %), une moins grande vitesse de compression (50 vs 60 mm.min⁻¹) et une plus grande dimension des cylindres de fromage (21x21 vs 10x10 mm de diamètre et de hauteur). La cohésion moyenne des fromages du groupe comprenant le Brie est de 0,28 (sans dimension) avec un intervalle de 0,14 à 0,69, ce qui est relativement comparable aux valeurs de cohésion obtenues pour les fromages Brie expérimentaux de cette étude ([0,40-0,64]) (figure 2-5 B, tableau 2-8 à l'annexe 2-3). La capacité gommante moyenne du groupe de fromage comprenant le Brie était de 3,72 N avec un intervalle de 0,85 à 6,40 N, ce qui est plus élevé que pour les fromages expérimentaux ([0,60-0,86]) (tableau 2-8 à l'annexe 2-3) notamment, car ce paramètre est calculé par fermeté*cohésion. La résilience n'a pas été rapportée dans les travaux d'Antonou et coll. (2000). L'adhésion a été évaluée dans cette dernière étude mais a été exprimée en cm² (aire sur le graphique), ce qui ne peut pas être comparé aux valeurs des fromages Brie expérimentaux de cette étude. Bien que les paramètres soient un peu différents de cette étude et que le groupe de fromage ne représente pas seulement les valeurs du fromage Brie et Camembert, les résultats semblent démontrer un comportement similaire.

Tableau 2-3. Valeurs de probabilité (p) de l'effet des variables étudiées (réduction en Na et temps d'affinage) sur les paramètres de texture des fromages Brie expérimentaux.

Paramètres de texture	Effet de la réduction en Na P	Effet de l'affinage P
Fermeté	0,8117	0,0004 **
Cohésion	0,3416	0,0007 **
Capacité gommante	0,7936	0,2352
Résilience	0,5244	0,0100 **
Adhésion	0,6174	0,0024 **

Les symboles (*) et (**) indique des valeurs de probabilité respectives de $p < 0,05$ et $p < 0,01$.

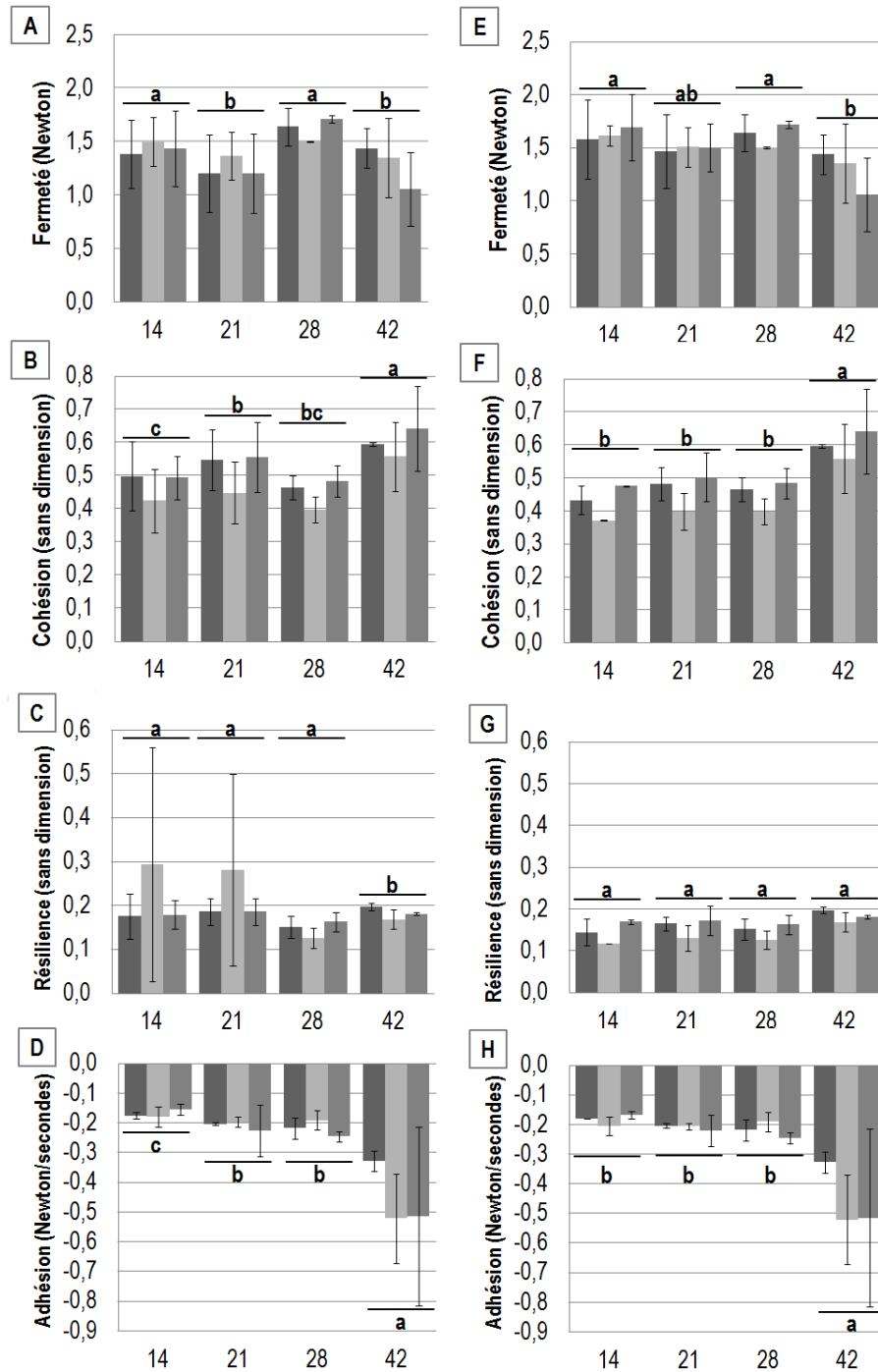


Figure 2-5. Texture des fromages Brie expérimentaux pendant l'affinage.

Pour A-B-C-D, moyenne \pm écart-type de 4 répétitions ($n = 4$) aux jours 14 et 21 ainsi que moyenne \pm écart-type de 2 répétitions ($n = 2$) aux jours 28 et 42. Pour E-F-G-H, $n = 2$ à tous les temps d'affinage. Les lettres différentes indiquent des différences significatives ($p < 0,05$). ■ CTL : fromage contrôle à condition saline standard; ■ R : fromage à condition saline réduite en Na par réduction nette; ■ S : fromage à condition saline réduite en sodium par substitution au KCl.

La littérature actuelle sur la texture du Camembert documente majoritairement les propriétés rhéologiques obtenues par compression et pénétrométrie. Les travaux de Champagne et coll. (2003) ont décrit l'impact de l'atmosphère contrôlée sur l'évolution du pH et de la texture du fromage Brie. Ils ont mesuré la force nécessaire pour atteindre 60 % de déformation (à 20 mm.min⁻¹ (0,33 mm.s⁻¹) avec plateau de compression de 35 mm) sur des cylindres de fromage (25 mm de diamètre et 30 mm de hauteur, conservé à 7 °C jusqu'à l'analyse, 2 répétitions de deux fromages et 5 cylindres par fromage), ce qui représente la fermeté du fromage. Le fromage témoin (qui est emballé et conservé à 7 °C) aux jours 12, 25, 47 et 78 a des valeurs de fermeté respectivement de 10,00 N, 12,67 N, 10,00 N et 6,67 N, démontrant que la fermeté du fromage augmente en début d'affinage et diminue par la suite. Ce phénomène de variation de la fermeté pendant l'affinage a aussi été remarqué par les travaux de Schlessler et coll. (1992) sur le Camembert pendant l'affinage qui ont démontré que le fromage subissant une compression à 50 % de déformation à 10 mm.min⁻¹ (0,17 mm/sec) sur des cylindres incluant la croûte (22 mm de diamètre et 27,5 mm de hauteur, 3 répétitions en triplicata à 24 °C) avec une cellule de test de compression présentait des valeurs de fermeté de 5,33 N, 8,14 N, 0,00 N (aucune résistance) et 0,22 N (très peu de résistance) respectivement aux jours 15, 22, 29 et 43. Les auteurs expliquent l'augmentation de la fermeté en début d'affinage (de J15 à J22) par l'évaporation de l'humidité à partir de la surface du fromage qui diminue alors le ratio eau:caséine, donc une force plus grande est nécessaire pour arriver à un même pourcentage de déformation. La forte diminution de la fermeté subséquente (aux jours 29 et 43), est expliquée par le phénomène de protéolyse qui devient plus important associé à la libération de davantage d'acides aminés désaminés et résulte en une augmentation du pH.

Il n'y a pas de corrélation entre le degré de protéolyse et les paramètres de texture pendant l'affinage des fromages Brie expérimentaux selon les conditions à l'étude (tableau 2-9 à l'annexe 2-4) bien que cela ait été le cas entre la protéolyse du fromage Brie et les mesures obtenues par compression et pénétrométrie (Molander et al., 1990). Les mesures rhéologiques sont toutefois encore plus significativement corrélées avec le pH et l'âge du fromage Brie comparativement au degré de protéolyse (Molander et al., 1990).

2.5.4. Impacts de la réduction en sodium sur la santé des consommateurs

Les cibles proposées par Santé Canada (2012) pour les fromages Brie et Camembert sont de réduire la teneur en sodium à 533 mg de sodium par 100 g de fromage. Ceci correspond à une réduction moyenne de 17 % qui a été établie afin d'éviter de compromettre la salubrité des fromages, la qualité du produit et l'acceptabilité par le consommateur.

Le fromage Brie commercial étudié contient 611 mg de sodium par 100 g de fromage (tableau 2-2). Théoriquement, une réduction de 12,8 % serait suffisante pour atteindre la cible de 533 mg de sodium par 100 g de fromage. Le fromage expérimental CTL contient 529 mg de sodium par 100 g de fromage, ce qui est déjà sous la cible proposée de 533 mg de sodium par 100 g de fromage. Les fromages expérimentaux R et S contiennent respectivement 390 et 419 mg de sodium par 100 g de fromage. Selon les statistiques, les fromages R et S ont la même teneur en sodium et ont donc une réduction moyenne en sodium de 23 %. Ces derniers contribueraient à diminuer encore plus significativement l'apport en sodium dans cette catégorie de fromages.

Du point de vue marketing, on peut se demander si la réduction en sodium peut être utilisée comme allégations nutritionnelles. Une allégation telle que « faible teneur en sel ou en sodium » sur l'emballage du produit nécessite que la portion recommandée contienne 140 mg de sodium ou moins selon l'article 32 du « Règlement des Aliments et Drogues » (Government of Canada, 2013). Pour une portion de 50 g, les fromages R et S apportent respectivement 195 et 210 mg de sodium, ce qui est supérieur à la teneur visée pour l'allégation précédemment citée. Il faudrait pousser la réduction du sodium à plus de 47 % dans le fromage Brie afin d'obtenir une teneur en sodium inférieure ou égale à 140 mg de sodium par 50 g de fromage.

Les fromages de cette étude n'ont pas été évalués par un panel de dégustation. Malgré ce manque à cette étude, l'acceptabilité des fromages réduits en Na a été étudiée dans les travaux de l'wanzack et coll. (1995). Les fromages dont le temps de saumurage était réduit à 75 % et 50 % (30 et 20 minutes) comparativement au temps standard (40 minutes) ont été préférés par le panel de dégustation, avec des réductions en sodium de 15,50 % et 4,31 % respectivement pour la réduction nette et de 46,22 % et 36,22 % pour la réduction par substitution au KCl. Les fromages réduits en sodium par la

diminution du temps de saumurage de 75 % présentaient des teneurs en sodium plus faibles de 30,71 % pour la réduction nette et de 46,10 % lors de la substitution au KCl. Ces valeurs sont similaires aux fromages un peu plus longuement saumurés. Les auteurs n'ont pas mentionné ce qui était moins apprécié dans leurs fromages les plus réduits en sodium. Il serait donc possible de pousser la réduction jusqu'à environ 47 % afin de répondre aux critères permettant l'utilisation de l'allégation « faible teneur en sel ou en sodium », mais il faudrait optimiser les conditions de saumurage et vérifier ces résultats pour un fromage Brie de type stabilisé. Dans les conditions étudiées, il ne serait pas permis non plus d'ajouter une allégation telle que « teneur réduite en sodium ou en sel » car selon l'article 33 (Government of Canada, 2013), une réduction de 25 % doit être atteinte. Les fromages réduits ont une réduction d'environ 23 % mais un ajustement des conditions de saumurage pourrait être effectué pour atteindre cette cible de réduction à 25 %.

L'augmentation de la teneur en potassium dans le fromage Brie par la substitution partielle au KCl permettrait de leur conférer une valeur ajoutée. L'apport suffisant recommandé n'est pas connu, mais il a été déterminé que l'apport maximal tolérable (AMT) est de 4,70 g de potassium par jour (Institute of Medicine of the National Academy of Sciences, 2005). Le potassium est reconnu pour favoriser la réduction de la pression artérielle et également des risques cardiovasculaires (Doyle & Glass, 2010; Institute of Medicine of the National Academy of Sciences, 2005). Plus de 97 % des Canadiennes et 86 % des Canadiens ne consomment pas suffisamment de potassium quotidiennement (Tanase et al., 2011). Une carence modérée en potassium peut causer des arythmies cardiaques, une faiblesse musculaire et une intolérance au glucose (Institute of Medicine of the National Academy of Sciences, 2005). Lorsque cette carence s'intensifie, des conséquences néfastes en résultent comme l'augmentation de la pression artérielle, de la sensibilité au sel, des risques de calculs rénaux, et du renouvellement des os (Institute of Medicine of the National Academy of Sciences, 2005). Le fromage S apporterait 77,4 mg de potassium par portion de 30 g de fromage comparativement à 24,0 mg par portion de 30 g de fromage CTL, ce qui représente une augmentation du potassium consommé de 53,4 mg. Bien que le contenu en potassium du fromage S ne soit pas suffisant pour qu'une allégation nutritionnelle soit affichée sur le produit, l'augmentation de la teneur en potassium du fromage S, comparativement au fromage CTL, contribuerait à augmenter la consommation de potassium des Canadiens et Canadiennes afin de réduire leurs risques de maladies cardiovasculaires.

2.6. Conclusion

Ces travaux présentent les impacts de la réduction en sodium par la réduction nette et par la substitution partielle au KCl sur le fromage Brie de type stabilisé. Il a été possible de réduire la teneur en sodium des fromages Brie d'environ 23 % par réduction nette et par substitution au KCl sans affecter la composition, la protéolyse et la texture pendant l'affinage. La variabilité observée entre les répétitions des fromages expérimentaux reflète celle rencontrée dans les industries fromagères. La variabilité observée entre les échantillons est probablement causée par le fait qu'il n'y a pas eu de contrôle précis sur tous les paramètres lors de la fabrication des fromages et lors de l'affinage (par exemple: la provenance des meules de fromage en début ou à la fin du lot).

La consommation de fromages à teneur en sodium similaire aux fromages R et S réduirait l'absorption du sodium chez les consommateurs. Le fromage S pourrait aussi favoriser une plus grande consommation en potassium. Une optimisation des conditions de saumurage du fromage Brie réduit en sodium, tout en vérifiant l'impact au niveau de la texture et du goût par un panel de dégustation, permettrait d'utiliser des allégations nutritionnelles comme « faible teneur en sel ou en sodium » ou « teneur réduite en sodium ou en sel » dans le but d'informer les consommateurs des changements apportés au fromage afin d'améliorer ses qualités nutritionnelles.

Chapitre 3. Effet de la réduction en sodium sur la bioaccessibilité des protéines d'un fromage à pâte molle à croûte fleurie lors d'une digestion *in vitro* simulée

« Effect of sodium reduction on the protein bioaccessibility of surface mould-ripened soft cheese during in vitro digestion simulation »

Christine Vallières ∴ Laurie-Eve Rioux ∴ Steve Labrie ∴ Sylvie L. Turgeon

Centre de recherche en sciences et technologie du lait (STELA)

Institut sur la nutrition et les aliments fonctionnels (INAF)

Département des Sciences des aliments, Université Laval, Québec, Québec, Canada.

L'objectif du chapitre 3 était de déterminer, en conditions simulant la digestion humaine dans un modèle *in vitro* statique, la désintégration et la libération des protéines du fromage Brie à condition saline standard, réduite en sodium par réduction nette et par substitution partielle au chlorure de potassium.

3.1. Résumé

La matrice alimentaire influence le comportement des aliments pendant la digestion gastro-intestinale et module la bioaccessibilité, ainsi que la biodisponibilité, des macronutriments comme les protéines et les lipides. La réduction du sodium dans les aliments transformés permettrait de réduire la prévalence à l'hypertension et des risques associés aux maladies cardiovasculaires. Cependant, les impacts de la réduction en sodium dans les fromages (par réduction et/ou substitution par le KCl) au niveau de la texture et du comportement pendant la digestion ne sont pas connus. Également, l'impact sur la microstructure de la matrice fromagère ainsi que sur le processus de désintégration et de libération des nutriments pendant la digestion n'est pas connu. Dans ce projet, des fromages Brie ont été produits en conditions industrielles en variant leur teneur en sodium (contrôle (CTL), réduite (R) et partiellement substituée au KCl (S)). Les fromages ont été caractérisés et ensuite digérés en utilisant un modèle statique *in vitro*. Les fromages n'étaient pas différents au niveau de la protéolyse et de la texture. La désintégration et de la libération des protéines pendant la digestion des fromages réguliers et réduits en sodium étaient similaires. La désintégration du fromage augmente pendant la digestion gastrique, ainsi que la libération des protéines. Cette étude démontre donc la possibilité de réduire le sodium du fromage Brie sans affecter les caractéristiques physico-chimiques et le comportement du fromage Brie pendant la digestion.

3.2. Abstract

Food matrix influences the behavior of food in the gastrointestinal digestion and modulates nutrients bioaccessibility and bioavailability such as proteins and lipids. Sodium reduction in processed foods could reduce the prevalence of hypertension and the risks associated with cardiovascular disease. However, the impact of sodium reduction and substitution by KCl on cheese texture and behavior during digestion are unknown. Also, the impact on the microstructure of the cheese matrix and on the processes of disintegration and release of nutrients during digestion is not known. The project aims to determine the impact of sodium reduction on the microstructure of the cheese matrix and therefore the effect on the disintegration process and nutrient release during digestion. Brie cheeses were produced under industrial conditions by varying the sodium content (control (CTL), reduced (R) and substituted with KCl (S)). Cheeses were characterized and digested in a static *in vitro* model. Proteolysis and texture were not different between CTL, R and S cheeses. Disintegration and protein release during digestion were similar for regular and sodium-reduced cheeses. Cheese disintegration increases during gastric digestion, as the release of proteins. This study demonstrates the possibility of reducing sodium without affecting the physical and chemical characteristics and also the behavior of Brie cheese during digestion.

3.3. Introduction

L'Organisation Mondiale de la Santé a établi en 2003 un objectif de consommation mondiale à 2 g de sodium par jour provenant du chlorure de sodium (équivalent à 5 g de NaCl) (World Health Organization & Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2003). Au Canada, la consommation quotidienne de sodium est d'environ 836 mg par jour de plus que l'apport maximal tolérable (AMT) qui est de 2300 par jour (Fischer et al., 2009). Plus de 85 % des Canadiens et entre 65-85 % des Canadiennes dépassent l'AMT en sodium à chaque jour (Health Canada, 2010) pouvant conduire à une hausse des maladies cardiovasculaires liées à l'hypertension.

La réduction de la consommation du sodium provenant des aliments permettrait de réduire les risques associés aux maladies cardiovasculaires (He & MacGregor, 2008). Le sodium est majoritairement retrouvé dans les aliments transformés tels que les produits de boulangerie, les viandes transformées, les légumes transformés, les soupes, les plats de pâtes et les fromages (Fischer et al., 2009). Les fromages ciblés par Santé Canada sont le fromage Cottage, le fromage à la crème, les fromages fondus, le Brie, le Camembert, le Cheddar, le Suisse, le Monterey Jack, le Brick, le Colby, le Gouda, la Mozzarella, le Parmesan et le Feta (Health Canada, 2012). Puisque le chlorure de sodium joue plusieurs rôles importants aux niveaux microbiologique, technologique et organoleptique, il n'est pas possible de simplement réduire cet ingrédient afin d'aider les consommateurs à réduire leur consommation en sodium. Les recherches actuelles sur la réduction en sodium dans les fromages se sont concentrées sur des fromages à pâte ferme comme le Cheddar (Mistry & Kasperson, 1998), le Munster (Pastorino et al., 2003) et la Mozzarella (Ayyash & Shah, 2011). Pour ces fromages, la réduction en sodium a affecté les propriétés texturales. Or, dans les fromages à pâte molle et croûte fleurie comme le Brie, le chlorure de sodium joue plusieurs rôles, notamment comme modulateur de la microflore durant l'affinage. La microflore de surface, constituée en particulier de *Penicillium camemberti* et de *Geotrichum candidum*, contribue à l'affinage du fromage en lui procurant sa croûte blanche caractéristique ainsi que sa pâte molle (Spinnler & Gripon, 2004). Bien que sa croissance soit limitée en présence de grande quantité de sel, *G. candidum* croît en excès lorsque la quantité de sel est faible et peut alors réduire la croissance de *P. camemberti* (Spinnler & Gripon, 2004). Ce débalancement de la microflore pourrait résulter en des variations au niveau de la protéolyse, de l'évolution du pH et donc de la texture finale du fromage.

La substitution partielle du sodium par du potassium dans le fromage Camembert a été proposée comme une alternative intéressante dans les travaux d'Iwanzack (1995). En effet, bien que le degré de protéolyse était plus élevé, les fromages partiellement réduits en sodium par du potassium ont été appréciés par le panel de dégustation qui, de plus, n'a pas été en mesure de discerner le fromage partiellement substitué du fromage standard. Le fromage réduit en sodium par substitution partielle au potassium avait été décrit comme plus ferme comparativement au standard, mais avec des saveurs et une croûte similaires au fromage standard (Iwanzak et al., 1995). Cependant, les changements de texture des fromages réduits en sodium par substitution partielle au KCl ont été décrits qualitativement, mais n'ont pas été quantifiés. Mis à part cette dernière étude qui décrit les impacts de la réduction en sodium sur le goût du Camembert, les conséquences sur la microstructure et conséquemment la vitesse de désintégration et de libération des protéines pendant la digestion n'ont jamais été étudiés.

Récemment, il a été énoncé que la forme/structure de l'aliment pourrait modifier le comportement de ce dernier pendant la digestion gastro-intestinale, notamment la vitesse de désintégration et la libération de nutriments (comme les protéines et les lipides) (Turgeon & Rioux, 2011). Ceci aurait pour conséquence d'influencer la bioaccessibilité et la biodisponibilité des nutriments (Aguilera, 2005; Norton et al., 2007; Turgeon & Rioux, 2011). La compréhension des phénomènes se produisant durant la digestion permettrait de mieux comprendre comment les propriétés intrinsèques des aliments modulés par les traitements technologiques sont modifiées durant le passage des aliments dans le tractus gastro-intestinal. Ceci permettrait d'élaborer de nouveaux produits alimentaires avec des propriétés fonctionnelles dans le but d'améliorer la santé (Parada & Aguilera, 2007; Sensoy, 2014; Singh et al., 2015). La désintégration des aliments est importante durant le processus de digestion, car elle permet d'exposer les enzymes digestives à leurs substrats. La désintégration de l'aliment est initiée lors de la mastication dans la bouche et se poursuit dans l'estomac par la distension stomacale qui favorise la friction entre les particules d'aliments et la paroi de l'estomac ainsi qu'entre les particules elles-mêmes (Kong & Singh, 2008). Les jus gastriques acides sont mis en contact avec les aliments ce qui favorise la désintégration par les enzymes qui hydrolysent les nutriments (par exemple : hydrolyse des protéines par la pepsine résultant en la formation de peptides). La vidange gastrique, qui s'effectue lorsque les particules du chyme sont inférieures à 2 mm, est plus rapide pour les aliments moins fermes comparativement aux aliments très fermes

(Bornhorst et al., 2015). Les procédés technologiques lors de la fabrication des aliments peuvent affecter la structure de la matrice ainsi que son comportement lors de la digestion. Une étude chez le mini-porc a démontré que la méthode de coagulation du lait influence la cinétique de biodisponibilité des protéines laitières (Barbé et al., 2014). En effet, l'arrivée dans le plasma des acides aminés des protéines d'un gel coagulé par la présure est plus lente que celle des acides aminés provenant des protéines d'un gel coagulé par acidification. Différentes cinétiques de libération des acides aminés pourraient, par exemple, moduler l'effet satiétogène des protéines (Tomé et al., 2009) ou la synthèse de protéine musculaire (Dangin et al., 2003). De plus, la désintégration des aliments et la libération des nutriments peuvent aussi être influencées par les procédés technologiques puisque ces derniers peuvent moduler la texture des aliments. En effet, des travaux sur le fromage Cheddar enrichi en calcium ont démontré qu'il est plus ferme et présente une désintégration plus lente comparativement au fromage Cheddar standard (Ayala-Bribiesca et al., 2016). Une étude sur la digestion des fromages Cheddar doux, Cheddar vieilli, Cheddar faible en matières grasses et Mozzarella a démontré l'impact de la structure de la matrice (Lamothe et al., 2012). La désintégration plus rapide au début de la digestion gastrique du fromage Cheddar vieilli est expliquée par sa plus grande friabilité et sa plus faible cohésion des particules de fromages comparativement aux autres types de fromages. L'augmentation de la désintégration pendant la digestion est toutefois similaire entre les fromages, avec des indices de désintégration de la matrice entre 25 % et 65 % à la fin de la digestion gastrique. Globalement, plus les fromages sont cohésifs et élastiques moins ils sont désintégrés pendant la digestion gastrique (Lamothe et al., 2012).

Le but de l'étude du chapitre 3 est de déterminer si la réduction en sodium affecte la désintégration de la matrice fromagère, ainsi que la libération des protéines pendant la digestion gastro-intestinale *in vitro* du fromage Brie.

3.4. Matériel & Méthodes

3.4.1. Fromages étudiés

La fabrication des fromages Brie de type stabilisés à teneur en sodium standard (fromage contrôle, CTL), réduite par réduction nette (réduite, R) et par substitution partielle au chlorure de potassium (substitué, S) a été décrite au chapitre 2 (section 2.4.1). Brièvement, le fromage CTL a été salé selon les conditions industrielles dans une saumure sursaturée en NaCl pendant 70 minutes. Le fromage R a aussi été salé dans une saumure sursaturée en NaCl, mais pendant 20 minutes seulement. Le fromage S a été salé dans une saumure dont une partie du NaCl a été remplacé par du KCl pendant 50 minutes selon les travaux de Touchette (2016). Les fromages fabriqués dans la première étude au chapitre 2 ont aussi été utilisés pour le chapitre 3.

3.4.2. Caractérisation des fromages

La détermination de la composition des fromages a été décrite au chapitre 2 (section 2.4.2). La détermination de la teneur en humidité (AOAC, 2008), en protéines (ISO/IDF, 2008), en cendres (AOAC, 2000), en minéraux (sodium, potassium, calcium et phosphore) (St-Gelais et al., 1992), en matières grasses (ISO/IDF, 2004) ainsi que le pH de la croûte et du centre (Touchette, 2016) des fromages Brie a été effectuée à $J28 \pm 2$. Les échantillons de fromage ont été prélevés au centre d'une meule intacte (AOAC, 2005) et ensuite broyés à l'aide d'un moulin à café à 4 °C. L'analyse de la teneur en humidité et en matières grasses a été effectuée sur des fromages frais (4 °C). Les analyses de la teneur en cendres, en minéraux ainsi que les mesures de pH ont été effectuées sur des fromages (quart de meule) mis sous-vide et congelé à -20 °C.

La détermination du degré de protéolyse des fromages a été décrite au chapitre 2 (section 2.4.3). Le degré de protéolyse permet de mettre en relation la quantité d'azote sous forme d'acides aminés, des peptides et des protéines solubles dans la phase aqueuse (NSE) (Ardö, 1999) sur la quantité totale d'azote présente dans l'échantillon de fromage. Le fractionnement brut du fromage dans l'eau permet

d'obtenir la fraction NSE du fromage conservé à 4 °C (IDF, 1991a). La méthode Kjeldhal a été utilisée pour quantifier la teneur en azote des fractions totales et soluble dans l'eau (ISO/IDF, 2008).

Le degré de protéolyse se calcule comme suit:

$$\left(\frac{NS}{NT}\right) \times 100 = \text{Degré de protéolyse (\%)} \quad (1)$$

NS: azote soluble (dans l'eau ou dans le TCA) (g/100g de fromage)

NT: azote total (g/100g de fromage)

La détermination des paramètres de texture a été décrite au chapitre 2 (section 2.4.4). L'analyse du profil textural (TPA) au texturomètre TA-XT₂ (Texture Technologies Corp, Hamilton, Massachusetts, États-Unis) se réfère à la méthode officielle (IDF, 1991b). La préparation des échantillons de fromage est décrite au chapitre 2 (section 2.4.4). Brièvement, 14 cylindres de 1 cm de diamètre et de 1 cm de hauteur sont prélevés au centre d'une meule de fromage à 4 °C à l'aide d'emporte-pièce (figure 2-2 à la section 2.4.4. du chapitre 2). Avant l'analyse, la température des cylindres de fromage est équilibrée 30 minutes à la température de la pièce (20 °C) dans une boîte de Pétri scellée avec du parafilm. Les paramètres du TPA sont les suivants: vitesse de 1 mm.s⁻¹, 2 compressions avec un cylindre en acrylique (TA-11, 25 mm de diamètre et 35 mm de hauteur, Texture Technologies Corp, Hamilton, Massachusetts, États-Unis) à 50 % de la hauteur originale du cylindre de fromage. L'analyse a été répétée 11 fois et 9 analyses ont été sélectionnées pour déterminer les paramètres de texture grâce au logiciel « *Texture Exposit Software* » (Version 6.1.7.0, Stable Micro System, Texture Technologies Corp, Hamilton, Massachusetts, États-Unis) (pour chaque analyse deux lectures avec des valeurs de fermeté extrêmes ont été éliminées). Les paramètres de texture étudiés sont la fermeté, la cohésion, la capacité gommante, la résilience et l'adhésion (tableau 2-8 à l'annexe 2-3) tels que suggéré pour des fromages de type Camembert (O'Callaghan & Guinee, 2004).

3.4.3. Digestion *in vitro* des fromages

3.4.3.1. Préparation des échantillons de fromages

La préparation des échantillons de fromage est effectuée par broyage dans un moulin à café (figure 3-6 à l'annexe 3-1) le matin même de la digestion dans une salle réfrigérée à 4 °C. Le fromage broyé est placé dans un bécher recouvert d'un papier d'aluminium et d'un élastique afin d'éviter les pertes en humidité. La pâte est mélangée à l'aide de spatules avant chaque prélèvement. Le prélèvement de la pâte de fromage s'effectue en faisant des petites boulettes de pâte à l'aide de deux spatules d'environ 1 cm³.

3.4.3.2. Modèle statique de digestion *in vitro*

Le modèle utilisé par Fang et coll. (2016b) est un modèle de digestion gastro-intestinal mono-compartmenté de type statique dont les conditions simulent la digestion humaine basées sur le modèle de Versantvoort et coll. (2005). La préparation des jus digestifs artificiels des étapes buccale, gastrique et duodénale a été décrite par Rinaldi et coll. (2014) en utilisant les enzymes obtenues chez Sigma Aldrich (Oakville, ON, Canada), soit l' α -amylase (A3176), la pepsine (P7000), la lipase (L3126), la bile (B8631) ainsi que la pancréatine (P7545) (tableau 3-2 à l'annexe 3-2).

Le modèle de digestion *in vitro* a été décrit par Fang et coll. (2016b). La digestion se déroule dans un bécher à double paroi (52 mm de diamètre interne et 74 mm de hauteur interne, Adams & Chittenden, Berkeley, CA, États-Unis) spécialement conçu afin de maintenir la température du contenu du bécher à 37 ± 1 °C. Le bécher présente une ouverture sur le côté afin d'y insérer une électrode dans le but de mesurer le pH en fonction du temps durant la digestion. Le contenu du bécher est agité (vitesse de cisaillement de 100 s⁻¹ (O2) et de 30 s⁻¹ (G30, G60, G120, D60)) par une géométrie en forme d'ancre de 38 mm de hauteur et 44 mm de diamètre (TA Instruments, New Castle, DE, États-Unis) positionnée à une hauteur de 1000 μ m à partir du fond du bécher et contrôlé par un rhéomètre AR-G2 (TA Instruments, New Castle, DE, États-Unis) muni du logiciel « Trios » (Version 3.1.5.3696, TA Instruments, New Castle, DE, États-Unis). Pendant la digestion *in vitro*, des

mesures de la viscosité ont été captées par l'instrument et ces valeurs permettent d'évaluer le niveau de dégradation de la matrice fromagère.

Toutes les étapes de digestion ont été effectuées dans le même bécher de façon consécutive et les différents paramètres sont résumés au tableau 3-3 de l'annexe 3-3. La digestion débute par l'ajout du fromage broyé (18 ± 1 g) et du jus buccal (12 mL) dans le bécher à double paroi. L'étape buccale avait une durée de 2 minutes. Du jus gastrique (21 mL) comprenant de la pepsine a ensuite été ajouté pour l'étape de digestion gastrique qui durait 2 heures. Après la première heure de digestion gastrique, de la pepsine (30 mg dans 3 mL de solution gastrique) a été ajoutée au mélange. Finalement, la digestion duodénale s'est déroulée pendant 1 heure à la suite de l'ajout du jus duodénal (36 mL).

Dans cette étude un contrôle rigoureux du pH a été réalisé en continu durant la digestion. Une standardisation des modèles de digestion *in vitro* a été proposée par Minekus et coll. (2014) pour les différentes étapes de digestion, ainsi les valeurs de pH visées pour les étapes buccale, gastrique et duodénale sont respectivement de 7,0, entre 2,0 et 4,0 ainsi que 7,0, respectivement. Pour mimer plus précisément le comportement *in vivo*, l'ajustement du pH a été réalisé graduellement dans les trente premières minutes, passant par les intervalles de pH de 6,5 à 6,0, puis à 5,0 et finalement à 2,5, de façon à mimer la digestion d'un repas (Aarak et al., 2013). Le contrôle du pH de la digestion des fromages expérimentaux a été assuré par l'utilisation de burette contenant du HCl 10 N et du NaOH 5 M. Les plages de pH visées dans cette étude sont les suivantes: 1) pH 6,5 de 0 à 5 minutes; 2) pH 6,5 à 6,0 de 5 à 10 minutes; 3) pH 6,0 à 5,0 de 10 à 20 minutes; 4) pH 5,0 à 2,5 de 20 à 30 minutes; 5) pH 2,5 pendant 30 à 120 minutes; 6) pH 6,75 de 120 à 180 minutes. Le contrôle du pH a été effectué par un titrateur automatique « T70 » (Mettler Toledo, Schwerzenbach, Suisse) muni d'une électrode à membrane plane « *InLab Surface*[®] » (Mettler Toledo, Schwerzenbach, Suisse) installée à l'horizontale sur le côté du bécher de digestion et de son logiciel « *LabX*[®] *titration light* » (Version 3.1, Mettler Toledo, Schwerzenbach, Suisse) (programmations détaillées aux tableaux 3-4, 3-5 et 3-6 à l'annexe 3-4).

Le pH final de chaque étape de digestion a été ajusté, si nécessaire, à $\text{pH } 7,00 \pm 0,05$ avec du NaOH/HCl pour arrêter l'action protéolytique des enzymes digestives. Les échantillons de digestion,

après avoir été refroidis dans la glace 10 minutes, ont ensuite été centrifugés à 9200 g à 4 °C pendant 20 minutes pour séparer les phases lipidique (couche de matières grasses), liquide (surnageant) et solide (culot). Les masses de chaque phase recueillie ont été mesurées. Dans le cas des échantillons de digestion duodénale, un inhibiteur de trypsine-chymotrypsine (Sigma-Aldrich, Oakville, Ontario, Canada) a été ajouté à une concentration de 24 µg.mL⁻¹ de surnageant pour arrêter l'action enzymatique de la pancréatine. Les échantillons ont été conservés à -80 °C afin de prévenir l'activité résiduelle des enzymes. Le surnageant contenait les jus digestifs, les nutriments libérés du fromage Brie dont les protéines et les peptides solubles dans la phase aqueuse. Le culot contenait le fromage qui n'était pas désintégré.

Pour chaque fromage étudié en digestion, six réactions de digestion ont été réalisées en parallèle puisque les prélèvements en cours d'expérimentation perturberaient la cinétique de digestion. Ainsi, six échantillons du même fromage ont donc été digérés en parallèle pour des périodes différentes (non digéré 4,5 g; O2 36 g; G30 36 g; G60 36 g; G120 36 g; D60 18 g) (figure 3-1). L'échantillon de fromage non digéré consiste à 4,5 g de fromage broyé, homogénéisé dans 9,0 mL d'eau à l'aide d'un disperseur « *Ultra-Turrax*® » avec la tige « T 25 S25N-18G » (IKA® Works Inc, Wilmington, Caroline du Nord, États-Unis) pendant 30 secondes à la vitesse 1 (6 500 rpm). Le pH est ajusté à 7,0 si nécessaire avec HCl/NaOH. L'échantillon de fromage non digéré est ensuite centrifugé à 9800 g pendant 20 minutes afin de séparer la matière grasse du surnageant du culot. La masse de chaque phase est notée.

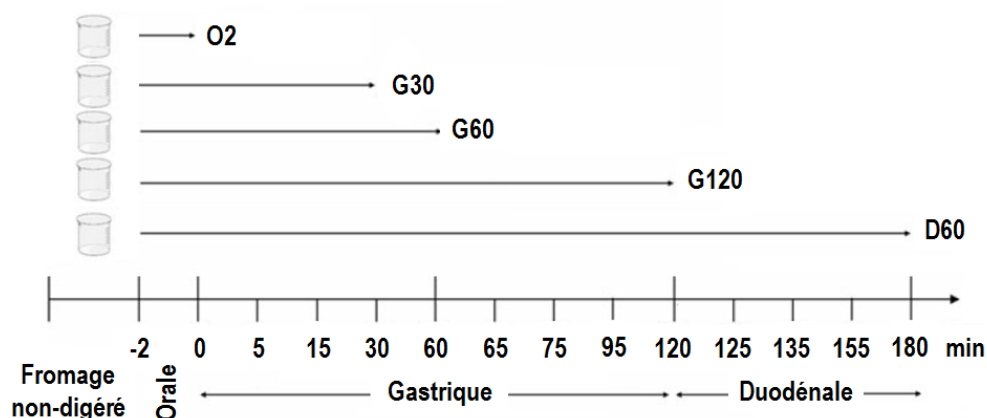


Figure 3-1. Schéma des échantillons de digestion *in vitro* des fromages Brie expérimentaux.¹
¹ Adaptée de Rioux et Turgeon (2012).

3.4.4. Comportement des fromages à la digestion

3.4.4.1. Bilan de masse

Le bilan de masse représente le pourcentage de matière grasse, de surnageant et de culot comparativement à l'échantillon total obtenu pour chaque étape de digestion étudiée.

$$\left(\frac{M_{phase}}{M_{fromage} + M_{solution}} \right) \times 100 = Bilan_{phase} \% \quad (2)$$

M_{phase} : masse de la phase lipidique ou liquide ou du culot (g)

$M_{fromage}$: masse du fromage (g)

$M_{solution}$: masse de tous les volumes de solution ajoutés pendant la digestion (g)

$Bilan_{phase}$: bilan de la matière grasse ou du surnageant ou du culot (g)

3.4.4.2. Désintégration de la matrice fromagère

La désintégration du fromage Brie est représentée par la quantité de solides totaux qui restent à la fin de l'étape de digestion dans le culot (ST_{culot}) par rapport à la quantité de solides totaux du fromage de départ ($ST_{fromage}$):

$$100 \% - \left(\frac{M_{culot} \times ST_{culot}}{M_{fromage} \times ST_{fromage}} \times 100 \right) = \% \text{ de désintégration du fromage } (3)$$

M_{culot} : masse du culot au temps t (g)

ST_{culot} : solides totaux du culot au temps t (g/100 g de culot)

$M_{fromage}$: masse du fromage utilisé au début de la digestion (g)

$ST_{fromage}$: solides totaux du fromage (g/100 g de fromage)

3.4.4.3. Libération des protéines

La détermination de l'azote libérée dans le surnageant durant la digestion a été effectuée sur le surnageant séché dans les cupules (60 °C pendant 24 heures) par la méthode de combustion selon le principe de Dumas (LECO, Saint-Joseph, Michigan, États-Unis) (IDF, 2002). La bioaccessibilité des protéines est évaluée par le pourcentage de protéines libérées au temps t de la digestion selon la quantité de protéines totales ajoutées au début de la digestion (apportées par le fromage).

$$\frac{M_{\text{surnageant}} \times [\text{Protéines}]_{\text{surnageant}}}{M_{\text{fromage}} \times [\text{Protéines}]_{\text{fromage}}} \times 100 = \% \text{ de protéines libérées} \quad (4)$$

M_{fromage} : masse du fromage mis au début de la digestion (g)

$[\text{Protéines}]_{\text{fromage}}$: concentration en protéines du fromage
(g/100g de fromage)

$M_{\text{surnageant}}$: masse du surnageant au temps t (g)

$[\text{Protéines}]_{\text{surnageant}}$: concentration en protéines du surnageant
(g/100g de culot)

3.4.4.4. Profil protéique

Le profil protéique dans la phase liquide (surnageant) pendant la digestion *in vitro* des fromages Brie expérimentaux a été évalué par SDS-PAGE (« sodium dodecyl sulphate-polyacrylamide gel electrophoresis », gel de concentration à 4,0 % et de séparation à 12,5 % d'acrylamide) précédemment décrit par Rioux et Turgeon (2012). La quantité de protéines ajoutées dans les puits est de 5 µg pour les standards et 10 µg pour les échantillons de fromage Brie et de digestion. L'utilisation d'une trousse de dosage utilisant le BCA (« bicinchonic acid ») selon les directives du fournisseur (Thermo Fisher Scientific, Waltham, Massachusetts, États-Unis) a permis de déterminer la concentration en protéines des échantillons.

3.4.5. Analyses statistiques

À la suite de problèmes lors de l'expérimentation, seuls deux des quatre répétitions de digestion ont pu être achevées sur la durée totale prévue. Les fromages de deux des quatre répétitions montraient des problèmes de texture qui ont empêché la collecte des données en fin d'expérimentation. L'analyse statistique de la composition des fromages ($n = 4$) a été présentée au chapitre 2 (section 2.4.5). Les analyses statistiques ($n = 2$) de la texture, du bilan de masse (matière grasse, surnageant, culot), de la désintégration du fromage et de la libération des protéines en fonction du temps de digestion ont été effectuées par le logiciel SAS (version 9.4 de SAS, SAS Institute, Cary, Caroline du Nord, États-Unis) en réalisant un test d'ANOVA en blocs complets aléatoires avec mesures répétées et des contrastes avec un niveau de signification de $p < 0,05$.

3.5. Résultats et discussion

3.5.1. Caractérisation des fromages

La caractérisation des fromages Brie expérimentaux CTL, R et S ($n = 4$) a été présentée au chapitre 2 (tableau 2-2 à la section 2.5.1). Les fromages ne sont pas différents au niveau de la composition ($p > 0,05$) sauf pour la teneur en potassium et en sodium ($p < 0,01$). Les fromages expérimentaux avaient, en moyenne, un contenu de 47,4 % d'humidité, 18,0 % de protéines, 30,2 % de matières grasses et 2,9 % de cendres (485 mg de calcium et 332 mg de phosphore par 100 g de fromage). Le contenu moyen en potassium des fromages CTL et R était de 89 mg par 100 g de fromage tandis que le fromage S en contenait 258 mg par 100 g de fromage. Le fromage S contenait davantage de potassium que les autres fromages en raison du salage réalisé dans la saumure contenant du KCl. Les fromages réduits (R et S) contenaient 405 mg de sodium par 100 g de fromage comparativement à 529 mg par 100 g de fromage CTL, ce qui équivaut à une réduction moyenne en sodium de 23 %. La réduction en sodium n'a toutefois pas influencé le degré de protéolyse des fromages expérimentaux, présentant, à J28, des valeurs moyennes de 34,2 % (NSE/NT) et 18,1 % (NSTCA/NT) (figure 2-4 à la section 2.5.2.1 du chapitre 2). Le pH de la croûte

(pH 6,19) ainsi que du centre (pH 5,44) des fromages expérimentaux à J28 n'ont pas été affectés par la réduction en sodium (tableau 2-2 à la section 2.5.1).

La texture des fromages Brie expérimentaux a été analysée avant la digestion *in vitro* à J28 (tableau 3-1). La réduction en sodium n'a eu aucun effet sur les paramètres de texture à l'étude, avec des valeurs moyennes de 1,62 N pour la fermeté (force maximale requise pour comprimer un aliment), de 0,45 pour la cohésion (degré de liaison entre les particules de l'aliment), de 0,73 N pour la capacité gommante (force nécessaire pour avaler un aliment semi-solide), de 0,15 pour la résilience (capacité à retrouver sa forme originale lors de la première compression) ainsi que de -0,22 N*sec pour l'adhésion (degré de liaison entre les particules de l'aliment) (tableau 3-1). Bien qu'aucune différence significative n'ait été démontrée, le fromage R a tendance à être moins ferme, moins cohésif, moins gommant, moins résilient et moins adhésif comparativement aux fromage CTL et S.

Tableau 3-1. Caractéristiques texturales des fromages Brie expérimentaux à J28.

Paramètres de texture (Unité)	CTL	R	S
Fermeté (Newton)	1,64 ± 0,18 ^a	1,50 ± 0,01 ^a	1,71 ± 0,04 ^a
Cohésion (Sans dimension)	0,46 ± 0,04 ^a	0,40 ± 0,04 ^a	0,48 ± 0,05 ^a
Capacité gommante (Newton)	0,76 ± 0,14 ^a	0,60 ± 0,06 ^a	0,83 ± 0,10 ^a
Résilience (Sans dimension)	0,15 ± 0,03 ^a	0,13 ± 0,02 ^a	0,16 ± 0,02 ^a
Adhésion (Newton*secondes)	-0,22 ± 0,04 ^a	-0,19 ± 0,03 ^a	-0,25 ± 0,02 ^a

Moyenne ± écart-type de 2 répétitions (n = 2). Les différentes lettres minuscules sur une même rangée indiquent des différences significatives (p < 0.05). CTL : fromage contrôle à condition saline standard ; R : fromage à condition saline réduite en Na par réduction nette ; S : fromage à condition saline réduite en sodium par substitution au KCl.

3.5.2. Comportement des fromages à la digestion *in vitro*

Pendant la digestion *in vitro*, il est possible de suivre en continu les mesures de pH ainsi que la viscosité du contenu du bécher. Seules les mesures de pH et de viscosité pendant la digestion *in vitro* du fromage CTL sont présentées à la figure 3-2, puisque les fromages R et S ont eu un comportement similaire. Durant la phase orale, le volume de chyme était trop faible, empêchant toute mesure de viscosité et de pH. Pendant cette étape, les particules de fromages préalablement broyées (pour imiter la mastication) étaient mélangées à la salive. Ensuite, le bolus a été mélangé avec les jus gastriques acides contenant des enzymes (pepsine) qui contribuent à la désintégration du fromage. La force d'agitation, engendrant des frictions entre la paroi et les particules et entre les particules elles-mêmes, contribuait aussi à la désintégration du bolus. Durant les premières 30 minutes de digestion gastrique, la viscosité et le pH augmentaient pour ensuite diminuer (figure 3-2). Au début de la digestion, le pH tendait à s'équilibrer entre le pH acide des jus gastriques et le pH plutôt neutre de la pâte du fromage (pH autour de 6,0). Ces valeurs sont supérieures au pH optimal de 2 à 4 de la pepsine (Sigma Aldrich, Oakville, Ontario, Canada). La viscosité augmentait durant les 30 premières minutes, ce qui est probablement attribuable à l'hydratation de la pâte. La désintégration enzymatique du fromage débutait de façon optimale lorsque le pH se situait entre 2 et 4, soit après 30 minutes de digestion. Le pH devait être contrôlé puisque lors de la digestion du fromage, les composés azotés libérés par la dégradation des protéines font augmenter le pH. Pendant la digestion duodénale, le pH augmentait rapidement en raison de l'ajout des jus duodénaux (pH 8,2). La viscosité diminue dès le début de la digestion duodénale en conséquence de la forte activité enzymatique de la pancréatine qui contribuait à la dégradation du réseau protéique du fromage. L'effet de dilution engendré par l'ajout des jus duodénaux contribuait aussi à réduire la viscosité du chyme.

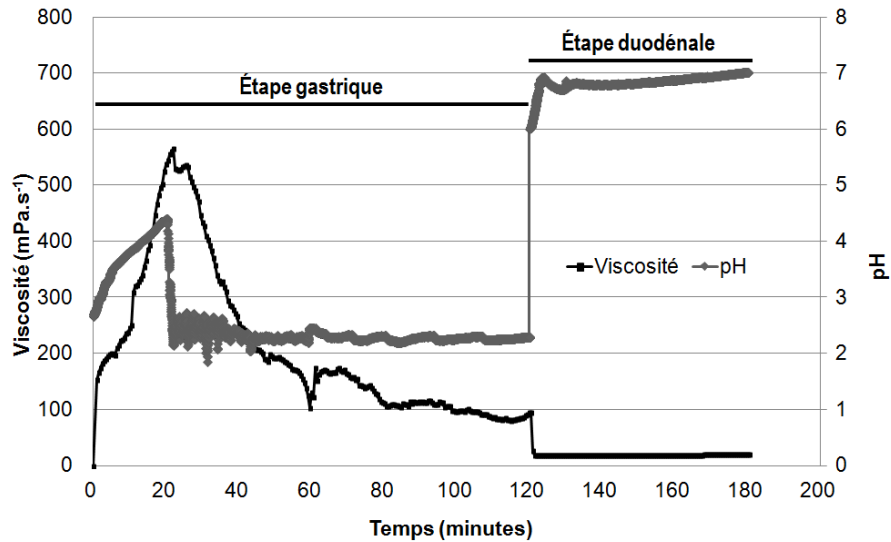


Figure 3-2. Mesures de viscosité et de pH durant la digestion *in vitro* gastrique et duodénale d'un fromage Brie CTL expérimental à J28.

3.5.2.1. Bilan de masse

Le bilan de masse permet d'évaluer l'évolution des phases du contenu gastro-intestinal pendant la digestion *in vitro* des fromages Brie expérimentaux (figure 3-3). À la fin de l'étape buccale, la phase lipidique du fromage CTL représentait 6,1 % de l'échantillon. Dès les premières 30 minutes de digestion gastrique, le bilan de masse de la phase lipidique du fromage CTL (13,9 %) démontre que la matière grasse était rapidement libérée du fromage, ceci s'explique par la libération de la majorité de la matière grasse qui était à l'état liquide à cette température, même si la matrice n'était pas très désintégrée (Fang et al., 2016a). Des peptides, des protéines et de l'eau peuvent se retrouver sous forme d'émulsion dans la phase lipidique, contribuant à une légère surestimation de ces valeurs (Fang et al., 2016a). La libération de la matière grasse du fromage CTL restait ensuite stable pour le reste de la digestion gastrique avec des valeurs de 11,1 % et 12,1 % respectivement aux étapes G60 et G120. L'absence de lipase gastrique dans ce modèle de digestion prévient la lipolyse des lipides gardant constants les niveaux de matière grasse dans la phase lipidique. Fang et coll. (2016a) ont obtenu une valeur de libération de la phase lipidique à 28 %, ce qui est nettement supérieur à ce qui a été obtenu dans cette étude. Or, le fromage Camembert utilisé dans les travaux de Fang et coll. (2016a) était différent du fromage Brie (plus gras et moins humide) ce qui pourrait expliquer les

différences observées. Aussi, la méthode de prélèvement de la matière grasse, qui était la même dans cette étude et ceux de Fang et coll. (2016a), pourrait influencer la quantité de matière grasse isolée dans cet échantillon, car peu de surnageant sépare la matière grasse du culot, rendant le prélèvement de la matière grasse difficile et dépendante du manipulateur. Des différences au niveau du modèle *in vitro* entre celui de Fang et coll. (2016a) et cette étude peuvent aussi avoir influencé la désintégration du fromage, comme le type d'agitation (rotatoire vs cisaillement) et le contrôle du pH (ajustement au début de la digestion vs en continu pendant toute la durée de la digestion). À la fin de la digestion duodénale (D60), la masse de la phase lipidique diminuait. La moins grande quantité de matières grasses entre les échantillons de digestion gastrique et l'échantillon de digestion duodénale est attribuée à l'action de la lipase pancréatique qui hydrolyse les triacylglycérols en acides gras libres à courtes, moyennes et longues chaînes (Jurado et al., 2006). Les acides gras libres à courte et moyenne chaînes passent dans la phase aqueuse (surnageant) (MacGregor et al., 1997), alors que les acides gras libres à longues chaînes ont tendance à précipiter en présence de calcium (Patton et al., 1985). Ceci pourrait expliquer la diminution de la masse réelle de matière grasse récupérée à la fin de la digestion duodénale.

Le fromage Brie CTL avait initialement 52,6 % de solides totaux, ce qui est similaire à l'échantillon de digestion buccale (O2) avec 56,8 % de phase solide (probablement plus élevé à cause de l'hydratation du fromage dans la solution buccale). Le bilan de masse de la phase solide du fromage CTL démontre ensuite que plus la digestion avançait, moins il y avait de résidus solides, correspondant à la désintégration du fromage. À la fin de la digestion gastrique (G120), la phase solide du fromage CTL diminuait à 18,2 %, ce qui est similaire aux résultats obtenus par Fang et coll. (2016a) pour le fromage Camembert (25,0 %). Cela indique que le fromage CTL était fortement désintégré à la fin de la digestion gastrique. Selon Fang et coll. (2016a), le degré de protéolyse élevé dans ce type de fromage à pâte molle à croûte fleurie contribue à la libération rapide des protéines et des peptides dans la phase liquide (surnageant), diminuant alors la masse de la phase solide. La masse de la phase solide augmentait à la fin de la digestion duodénale D60 (30,6 %) comparativement à la valeur obtenue à la fin de la digestion gastrique (18,2 %). Des résultats similaires ont aussi été observés dans l'étude de Fang et coll. (2016a). L'augmentation de la masse du culot pourrait être attribuée à la précipitation des acides gras libres à longue chaîne avec le calcium.

Selon la composition et la texture initiale du fromage, différents comportements peuvent être observés pendant la digestion. Par exemple, un fromage à pâte molle peut facilement se désintégrer en opposition à un fromage Mozzarella qui est plus élastique et plus ferme (Fang et al., 2016a). Au sein d'une même variété de fromage, la technologie fromagère, comme la maturation de fromage, peut aussi avoir un impact sur la digestion. La désintégration du fromage Cheddar vieilli est plus rapide à cause de sa grande friabilité qui apporte à la matrice un caractère moins élastique et cohésif comparativement au fromage Cheddar doux (Lamothe et al., 2012). Les travaux d'Ayala-Bribiesca et coll. (2016) ont démontré que la modification de la composition d'un fromage a ralenti la désintégration à cause de la plus grande fermeté du Cheddar expérimental qui résulte de l'enrichissement en calcium. Bien que le degré de protéolyse soit un peu plus prononcé dans le fromage Camembert partiellement substitué au KCl comparativement au standard dans les travaux d'Iwanzack et coll. (1995), le panel de dégustation n'a pas été en mesure de discerner le fromage partiellement substitué au KCl du standard. La description sensorielle du fromage Camembert partiellement substitué au KCl était rapportée comme ayant un corps plus ferme, ainsi que des saveurs et une croûte similaires au fromage standard. En réduisant le sodium dans le fromage Brie, la texture pourrait en être affectée de manière significative et cela pourrait avoir un impact sur la digestion du fromage. Cependant, la réduction en sodium n'a pas influencé la texture des fromages Brie expérimentaux R et S (tableau 3-1) ainsi que les bilans de masse de la phase solide, la phase liquide (surnageant) ainsi que de la phase lipidique ($p > 0,05$) comparativement au fromage Brie CTL (figure 3-3).

Le temps de digestion avait un effet significatif sur le bilan de masse de la phase solide ($p < 0,0001$), bien que les valeurs semblent plutôt stables en fonction du temps. Le bilan de masse a été évalué sur les masses humides des phases. Cependant, les culots de fromages Brie expérimentaux digérés ont la capacité de retenir l'eau, affectant le bilan de masse de la phase solide. La désintégration du fromage Brie a donc été évaluée sur le poids sec du culot et des matières sèches du fromage ajoutées au début de la digestion.

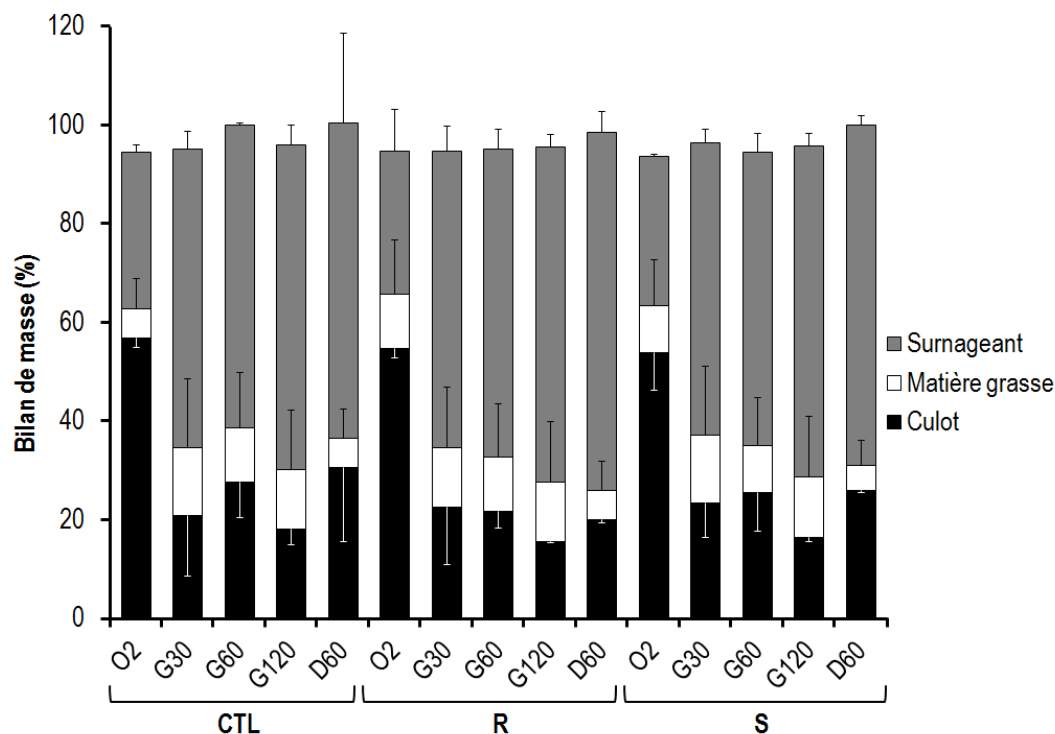


Figure 3-3. Bilan de masse de la phase liquide (surnageant), de la phase lipidique (matière grasse) et de la phase solide (culot) des fromages Brie expérimentaux pendant la digestion *in vitro*.

O: étape orale, G: étape gastrique, D: étape duodénale. CTL : fromage contrôle à condition saline standard ; R : fromage à condition saline réduite en Na par réduction nette ; S : fromage à condition saline réduite en sodium par substitution au KCl.

3.5.2.2. Désintégration de la matrice fromagère

L'évolution de la désintégration du fromage Brie CTL dans le temps est une variable significative ($p = 0,0007$) (figure 3-4A). Après 2 minutes de digestion orale, 25,4 % du fromage CTL était désintégrés ce qui est différent des résultats obtenus par Fang et coll. (2016a) avec le Camembert qui s'est désintégré à 83 % lors de la même période. Il est à considérer qu'après 2 minutes de digestion l'échantillon n'est peut-être pas parfaitement homogène, justifiant les différences observées. De plus, le fromage Camembert a une moins grande cohésion et adhésion comparativement au fromage Brie CTL, ce qui pourrait faciliter sa désintégration. Pendant la digestion gastrique, la désintégration du fromage Brie CTL augmentait en fonction du temps pour atteindre une valeur de 65,9 % à l'étape G120. Cette valeur semble maximale puisqu'à la fin de la

digestion duodénale (D60), la désintégration du fromage Brie CTL était de 67,2 %. La réduction du sodium n'a pas eu d'impact sur la désintégration du fromage Brie pendant la digestion *in vitro* ($p = 0,7868$). Les résultats de désintégration obtenus pour les fromages Brie CTL, R et S à la fin de la digestion gastrique étaient similaires à ceux obtenus dans l'étude de Fang et coll. (2016a) (76 % de désintégration). Cependant à la fin de la digestion duodénale, seulement 53 % du fromage Camembert était digéré en comparaison avec 67,2 % du fromage Brie CTL. Il est possible que cela soit associé à une fermeté moins grande pour le Brie comparativement au Camembert. Lors de la digestion, les fromages Brie CTL, R et S ne présentaient pas exactement la même désintégration. Une grande variabilité, surtout au début de la digestion (G30), a été observée à un moment où le chyme est peut-être moins homogène en début de digestion. Par contre, la désintégration du fromage Brie à la fin de la digestion duodénale était similaire selon les conditions expérimentales de digestion *in vitro* étudiées, ce qui a aussi été démontré dans d'autres variétés de fromage (Lamothe et al., 2012). Les travaux sur les fromages Mozzarella, Cheddar doux, Cheddar vieilli et Cheddar réduit en matières grasses ont démontré que la désintégration est plus importante durant l'étape de digestion gastrique lorsque le fromage est moins élastique et moins cohésif (Lamothe et al., 2012). De plus, un fromage moins ferme se désintégrera plus rapidement (Ayala-Bribiesca et al., 2016; Lamothe et al., 2012)

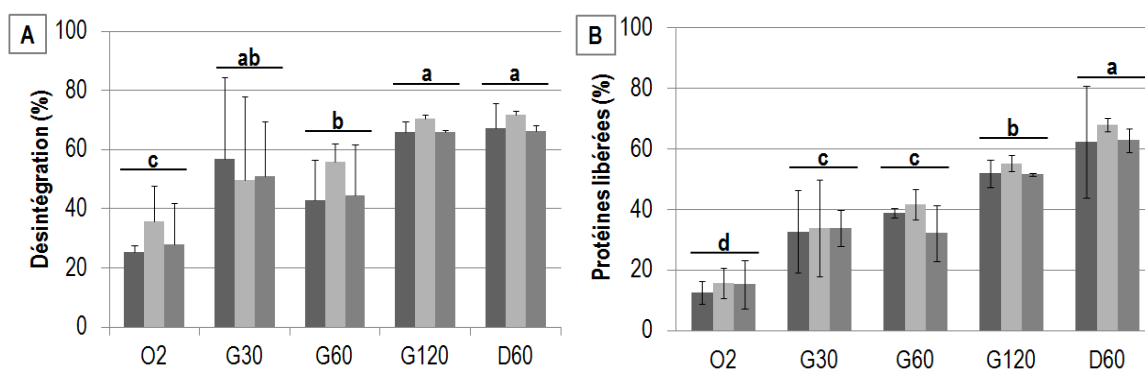


Figure 3-4. Désintégration (A) et libération des protéines (B) des fromages Brie expérimentaux pendant la digestion *in vitro*.

O: étape orale, G: étape gastrique, D: étape duodénale. ■ CTL : fromage contrôle à condition saline standard; ■ R : fromage à condition saline réduite en Na par réduction nette; ■ S : fromage à condition saline réduite en sodium par substitution au KCl.

3.5.2.3. Bioaccessibilité des protéines

Pendant la digestion du fromage, les protéines sont davantage accessibles pour être hydrolysées par les protéases lorsque la matrice fromagère se désintègre. L'hydrolyse des protéines permet alors la libération de courts peptides et acides aminés qui pourront alors être absorbés par le corps humain. La libération des protéines du fromage Brie CTL augmentait en fonction du temps de digestion ($p < 0,0001$) avec des valeurs de 12 %, 32 %, 38 %, 51 % et 62 % respectivement aux étapes O2, G30, G60, G120 et D60 (figure 3-4B). La libération des protéines augmentait de façon similaire au phénomène de désintégration du fromage (figure 3-4). Une grande variabilité des données a été observée à l'étape G30, ce qui a été constaté également lors du phénomène de désintégration. Davantage de protéines étaient libérées pendant l'étape duodénale en raison de la forte activité protéolytique des enzymes pancréatiques. Le fromage Camembert étudié par Fang et coll. (2016a) a présenté un comportement similaire aux étapes O2 et G30, pour ensuite avoir une plus faible libération de protéines aux étapes G60 et G120. Cependant, dans l'étude de Fang et coll. (2016a), il est possible que la libération des protéines ait été sous-estimée, puisqu'elle a été calculée selon des valeurs obtenues avec la méthode au BCA (« *bicinchoninic acid* ») qui ne détecte que les acides aminés, les di-, tri- et tétra-peptides renfermant des résidus cystéine, tyrosine et/ou tryptophane (Wiechelman et al., 1988), tandis que dans cette étude, la libération des protéines a été calculée selon des valeurs d'azote total obtenues par la méthode de combustion selon le principe de Dumas. Comparativement au fromage Brie CTL, les fromages Brie expérimentaux R et S ont démontré une libération des protéines similaire en fonction du temps de digestion ($p = 0,7333$) (figure 3-4B).

Le profil protéique reflète l'activité protéolytique des enzymes gastriques et duodénales lors de la digestion *in vitro*. L'évolution de la libération et la dégradation des protéines ont été visualisées pour le fromage Brie CTL par un SDS-PAGE (figure 3-5). Aucune différence n'a été détectée entre les profils protéiques des fromages Brie CTL, R et S (figure 3-5). Une grande quantité de protéines et de peptides était présente à l'étape orale, probablement à cause du degré de protéolyse du fromage Brie qui était assez élevé à J28. Une augmentation des peptides de faible poids moléculaire en fonction du temps pendant la digestion gastrique est observée, ce qui concorde aussi avec les résultats de Fang et coll. (2016a). Cependant, contrairement à cette dernière étude, des caséines étaient toujours observées à la fin de la digestion gastrique (G120). Ceci semble avoir peu d'effet sur la bioaccessibilité des protéines puisqu'à la fin de la digestion duodénale (D60), toutes les protéines

laitières sont digérées. Seules les bandes des enzymes ajoutées dans le modèle de digestion *in vitro* sont visibles (Fang et al., 2016a; Rioux & Turgeon, 2012).

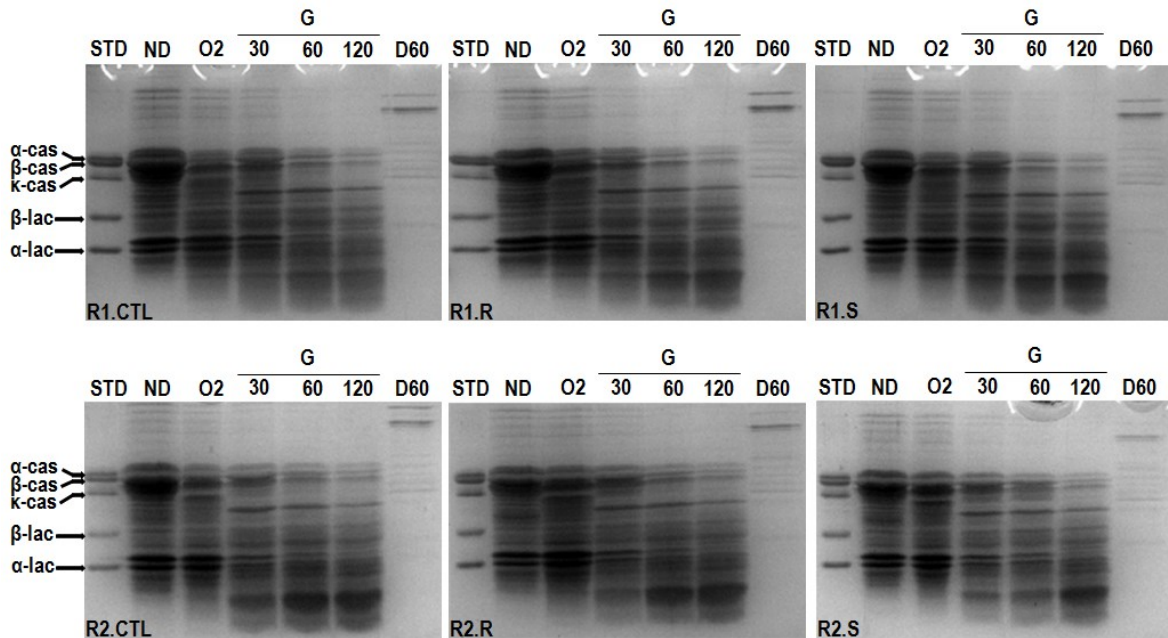


Figure 3-5. Profil protéique des surnageants des fromages Brie expérimentaux CTL, R et S aux étapes de digestion *in vitro* orale (O2), gastrique (G30, G60, G120) et duodénale (D60). Standard de protéines du lait (α -caséine (α -cas), β -caséine (β -cas), κ -caséine (κ -cas), β -lactoglobuline (β -lac), α -lactalbumine (α -lac) (Sigma Aldrich, Oakville, ON, Canada)). CTL : fromage contrôle à condition saline standard; R : fromage à condition saline réduite en Na par réduction nette; S : fromage à condition saline réduite en sodium par substitution au KCl.

3.5.2.4. Limites du modèle de digestion *in vitro*

Le modèle utilisé comporte certaines limites expérimentales comparativement au processus *in vivo*. La désintégration du fromage Brie atteint une valeur limite, peut-être à cause de l'effet de la sursaturation en composés hydrolysés accumulés dans le béccher, alors que normalement chez l'humain ils seraient graduellement vidangés et absorbés par les cellules gastro-intestinales. Cette sursaturation pourrait donc réduire l'efficacité des enzymes gastriques et duodénales présentes dans le modèle. D'autre part, le processus d'agitation diffère des actions d'agitation physiologiques dans

l'estomac et l'intestin. La désintégration pourrait être favorisée par l'augmentation de la vitesse de cisaillement dans le modèle, mais ne mimerait pas parfaitement les phénomènes *in vivo*. Bien que le modèle ait certaines limites, il a été possible de déterminer que, dans les conditions étudiées, la réduction en sodium du fromage Brie, allant jusqu'à 23 %, n'a pas eu d'impact sur la composition (mis à part le contenu en sodium et en potassium), la désintégration et la libération des protéines pendant la digestion *in vitro* simulant la digestion humaine.

3.6. Conclusion

Cette étude s'intéressait à la digestion de fromages Brie dont la teneur en sodium était standard, réduite ou substituée en KCl à l'aide d'un modèle *in vitro*. Le comportement à la digestion de fromage Brie de type stabilisé était similaire entre les fromages expérimentaux CTL, R et S dans les conditions étudiées. La désintégration et la libération des protéines n'ont pas été affectées par la réduction en sodium du fromage Brie. La désintégration maximale atteinte était de 67 % à la fin de la digestion duodénale. La réduction en sodium n'affecte donc pas la bioaccessibilité des protéines du fromage Brie *in vitro* ce qui pourrait éventuellement être confirmé *in vivo*. Les résultats du projet appuient les démarches de réduction du sodium dans les fromages de spécialités.

Conclusion générale et perspectives

Ce projet de maîtrise avait pour but d'évaluer l'impact de la réduction en sodium sur la texture et le degré de protéolyse pendant l'affinage, ainsi que la bioaccessibilité des protéines pendant la digestion *in vitro* d'un fromage Brie industriel de type stabilisé.

Effet de la réduction en sodium sur les propriétés physico-chimiques du fromage Brie industriel de type stabilisé

Le premier objectif de l'étude était de fabriquer, en entreprise, les fromages expérimentaux à l'étude, soit un fromage Brie contrôle, un fromage Brie réduit en sodium par réduction nette et un fromage Brie réduit en sodium par substitution partielle avec du potassium provenant du KCl. Tel que démontré lors de travaux antérieurs (Touchette, 2016), il a été possible de réduire de 23 % le contenu en sodium dans les fromages réduits par réduction nette et par substitution partielle au KCl.

Le choix d'utiliser des fromages provenant d'une entreprise était motivé par l'obtention de résultats se rapprochant le plus de l'application des résultats, tout en assumant la possible variabilité inter-lots. Cette variabilité s'est exprimée par les fromages des répétitions 3 et 4 qui montraient des différences importantes comparativement aux fromages des répétitions 1 et 2. Ceci montre donc que les autres paramètres de fabrication du fromage à croûte fleurie peuvent occulter les variations induites par les changements effectués lors du salage.

Avant de transposer les conditions de saumurage utilisées dans ces travaux pour la production de fromages Brie commerciaux de type stabilisés, il sera nécessaire d'évaluer les coûts engendrés par l'utilisation du KCl, ainsi que les répercussions sur le prix de vente du fromage. En effet, le KCl est plus coûteux que le NaCl. Un élément à tenir en compte est la gestion éventuelle du bain de saumure contenant à la fois du NaCl et du KCl. La diffusion des deux sels dans le fromage étant différente, la vérification de la concentration de chacun des sels devrait être effectuée à chaque lot afin d'éviter un déséquilibre du ratio ionique recherché. Pour les fromages réduits sans remplacement, ce problème ne se pose pas puisque seul le temps de saumurage est modifié.

Dans la mesure où les coûts seraient convenables, il faudrait valider l'acceptabilité des fromages réduits en sodium par un panel de dégustation entraîné et par un panel de consommateurs naïfs. L'effet de la réduction en sodium sur la composition d'un fromage Brie industriel de type stabilisé à J28 a été évalué au niveau de la teneur en humidité, en protéines, en matières grasses, en cendres ainsi que la teneur en certains minéraux (calcium, phosphore, sodium et potassium). Mis à part le contenu en sodium et en potassium, les conditions de saumurage visant à réduire le contenu en sodium n'ont pas affecté les paramètres de composition étudiés. La réduction en sodium dans un fromage à pâte molle à croûte fleurie n'influence pas le degré de protéolyse et la texture durant l'affinage, ni même le pH du centre et de la croûte du fromage, tous des paramètres indirects indiquant que les activités de la microflore d'affinage n'ont pas été influencées par la réduction en sodium. Pour avoir davantage d'information sur les phénomènes se déroulant pendant l'affinage, il aurait fallu suivre aussi le pH du centre et de la croûte des fromages expérimentaux pendant l'affinage en parallèle avec les mesures de degré de protéolyse et de la texture. Également, un suivi des populations microbiologiques et de leurs activités pourrait compléter ces travaux.

Effet de la réduction en sodium sur la bioaccessibilité des protéines du fromage Brie industriel de type stabilisé pendant la digestion *in vitro*

Le comportement des fromages expérimentaux pendant la digestion *in vitro* simulant les étapes gastrique et duodénale a été suivi par les bilans de masse des échantillons obtenus, le pourcentage de désintégration des fromages ainsi que par la quantification des protéines libérées pendant la digestion. Un changement au niveau de la matrice de l'aliment pourrait affecter son potentiel de désintégration à la digestion et alors influencer la libération des protéines. Or, dans les conditions de digestion *in vitro* étudiées, les fromages expérimentaux ont présenté des profils de bilans de masse, de désintégration du fromage ainsi que de libération de protéines similaires en fonction du temps de digestion. Il est alors supposé que la structure du fromage n'a pas été affectée par la réduction en sodium. Afin de bonifier ces travaux, il pourrait être pertinent de valider les résultats *in vitro* dans un modèle de digestion plus sophistiqué comme le modèle gastro-intestinal TIM et éventuellement chez des sujets humains dans une étude clinique en utilisant des fromages ayant démontré des différences de bioaccessibilité.

L'hypothèse du projet était que la réduction en sodium dans un fromage à pâte molle à croûte fleurie influence la texture pendant l'affinage ainsi que la bioaccessibilité des protéines pendant la digestion *in vitro* simulant les conditions gastro-intestinales chez l'humain. Suite à l'analyse des résultats obtenus dans le cadre de ce projet de maîtrise, l'hypothèse initiale de cette étude est alors rejetée. Comme c'est le cas avec d'autres variétés de fromage, il est possible de réduire le sodium d'un fromage à pâte molle à croûte fleurie comme le Brie en modifiant les conditions de saumurage. Il est vrai que toutes les conditions ne sont pas optimales pour obtenir des fromages avec des qualités organoleptiques acceptables, c'est pourquoi il faut optimiser les méthodes de réduction en sodium selon les méthodes de salage et les variétés de fromages. La réduction en sodium a aussi été possible dans d'autres variétés de fromages, comme cela a été mentionné dans la revue de littérature. Bien que les fromages diffèrent notamment au niveau de la variété, du procédé de fabrication et de la composition physico-chimique, les nombreux travaux sur la réduction en sodium des fromages démontrent qu'il est possible d'obtenir des fromages réduits en sodium dont les qualités du produit final sont aussi acceptables que le produit standard.

Ce projet s'est intéressé à la réduction du sodium dans le fromage Brie car très peu de littérature couvre les fromages de spécialité, comme les fromages à pâte molle à croûte fleurie. Les cibles de réduction du sodium dans les aliments transformés proposées par Santé Canada touchent plus sévèrement les fromages puisque le NaCl joue plusieurs rôles cruciaux dans les produits finaux. Les résultats de ce projet permettent d'appuyer les démarches de réduction du sodium dans les fromages, si les résultats organoleptiques éventuellement générés sur ceux-ci sont acceptables pour les consommateurs. La formulation du fromage Brie a pu être améliorée par la réduction du sodium tout en ayant conservé les attributs santé de cet aliment.

Bibliographie

- Aarak, K. E., Rigby, N. M., Kirkhus, B., Salt, L. J., Sahlstrom, S., Bengtsson, G. B., Vegarud, G. E., & Mackie, A. R. (2013). The impact of meal composition on the release of fatty acids from salmon during in vitro gastrointestinal digestion. *Food & Function*, 4(12), 1819-1826.
- Agarwal, S., McCoy, D., Graves, W., Gerard, P. D., & Clark, S. (2011). Sodium content in retail Cheddar, Mozzarella, and process cheeses varies considerably in the United States. *Journal of Dairy Science*, 94(3), 1605-1615.
- Aguilera, J. M. (2005). Why food microstructure? *Journal of Food Engineering*, 67(1-2), 3-11.
- Aly, M. E. (1995). An attempt for producing low-sodium Feta-type cheese. *Food Chemistry*, 52(3), 295-299.
- Aly, S. A., & Galal, E. A. (2002). Effect of milk pretreatment on the keeping quality of domiati cheese. *Pakistan Journal of Nutrition*, 1(3), 132-136.
- Antila, P., Paakkari, I., Järvinen, A., Mattila, M. J., Laukkanen, M., Pihlanto-Leppälä, A., Mäntsälä, P., & Hellman, J. (1991). Opioid peptides derived from in-vitro proteolysis of bovine whey proteins. *International Dairy Journal*, 1(4), 215-229.
- Antoniou, K. D., Petridis, D., Raphaelides, S., Omar, Z. Ben, & Kesteloot, R. (2000). Texture assessment of French cheeses. *Journal of Food Science*, 65(1), 168-172.
- AOAC. (2000). Ash of cheese. Method no. 935.42. In W. Horwitz (Ed.), *Official methods of analysis of AOAC International*. Gaithersburg, MD, USA: Association of Official Analytical Chemists International.
- AOAC. (2005). Preparation of test portion. Method no. 955.30. In W. Horwitz (Ed.), *Official methods of analysis of AOAC International*. Gaithersburg, MD, USA: Association of Official Analytical Chemists International.
- AOAC. (2008). Loss on drying (moisture) in cheese. Method no. 926.08. In W. Horwitz (Ed.), *Official methods of analysis of AOAC International*. Gaithersburg, MD, USA: Association of Official Analytical Chemists International.
- Ardö, Y. (1999). Chapter 2: Evaluating proteolysis by analysing the N content of cheese fractions. *Bulletin of the International Dairy Federation*, 337, 4-16.
- Ayala-Bribiesca, E., Lussier, M., Chabot, D., Turgeon, S. L., & Britten, M. (2016). Effect of calcium enrichment of Cheddar cheese on its structure, in vitro digestion and lipid bioaccessibility. *International Dairy Journal*, 53(February 2016), 1-9.
- Ayyash, M. M., & Shah, N. P. (2011). The effect of substitution of NaCl with KCl on chemical composition and functional properties of low-moisture Mozzarella cheese. *Journal of dairy science*, 94(8), 3761-3768.
- Ayyash, M. M., Sherkat, F., Francis, P., Williams, R. P. W., & Shah, N. P. (2011). The effect of sodium chloride substitution with potassium chloride on texture profile and microstructure of Halloumi cheese. *Journal of Dairy Science*, 94(1), 37-42.
- Banks, J. M., Hunter, E. A., & Muir, D. D. (1993). Sensory properties of low fat cheddar cheese: effect of salt content and adjunct culture. *International Journal of Dairy Technology*, 46(4), 119-123.
- Barbé, F., Ménard, O., Gouar, Y. L., Buffière, C., Famelart, M.-H., Laroche, B., Feunteun, S. L., Rémond, D., & Dupont, D. (2014). Acid and rennet gels exhibit strong differences in the kinetics of milk protein digestion and amino acid bioavailability. *Food Chemistry*, 143(0), 1-8.
- Barbé, F., Ménard, O., Le Gouar, Y., Buffière, C., Famelart, M.-H., Laroche, B., Le Feunteun, S., Dupont, D., & Rémond, D. (2013). The heat treatment and the gelation are strong determinants of the kinetics of milk proteins digestion and of the peripheral availability of amino acids. *Food Chemistry*, 136(3-4), 1203-1212.
- Bellamy, W., Takase, M., Wakabayashi, H., Kawase, K., & Tomita, M. (1992). Antibacterial spectrum of lactoferricin B, a potent bactericidal peptide derived from the N-terminal region of bovine lactoferrin. *Journal of Applied Bacteriology*, 73(6), 472-479.
- Bergmann, J F, Chassany, O, Petit, A, Triki, R, Caulin, C, & Segrestaa, J M. (1992). Correlation between echographic gastric emptying and appetite: influence of psyllium. *Gut*, 33(8), 1042-1043.

- Bornhorst, G. M., Ferrua, M. J., & Singh, R. P. (2015). A proposed food breakdown classification system to predict food behavior during gastric digestion. *Journal of Food Science*, 80(5), R924-R934.
- Bourne, M. C. (2002). Chapter 7: Sensory methods of texture and viscosity measurement. In M. C. Bourne (Ed.), *Food Texture and Viscosity (Second Edition)* (pp. 257-291). London: Academic Press.
- Boutrou, R., Gaucheron, F., Piot, M., Michel, F., Maubois, J.-L., & Léonil, J. (1999). Changes in the composition of juice expressed from Camembert cheese during ripening. *Lait*, 79(5), 503-513.
- Bringe, N. A., & Kinsella, J. E. (1986). Influence of calcium chloride on the chymosin-initiated coagulation of casein micelles. *Journal of Dairy Research*, 53(03), 371-379.
- Calbet, J. A. L., & Holst, J. J. (2004). Gastric emptying, gastric secretion and enterogastrone response after administration of milk proteins or their peptide hydrolysates in humans. *European Journal of Nutrition*, 43(3), 127-139.
- Canadian Dairy Information Centre. (2013a). Manufacturing of dairy products - Cheese - Production of cheese by variety in Canada. Retrieved January 7th 2016, from http://www.dairyinfo.gc.ca/index_e.php?s1=df-fcil&s2=proc-trans&s3=psdp-pvpl&s4=cp-pf&page=prod_var_can
- Canadian Dairy Information Centre. (2013b). Manufacturing of dairy products - Cheese - Production of specialty cheese ('000 kg). Retrieved January 7th 2016, from http://www.dairyinfo.gc.ca/index_e.php?s1=df-fcil&s2=proc-trans&s3=psdp-pvpl&s4=cp-pf&page=prodspecial
- Cappuccio, F. P., Kalaitzidis, R., Duncliff, S., & Eastwood, J. B. (2000). Unravelling the links between calcium excretion, salt intake, hypertension, kidney stones and bone metabolism. *Journal of nephrology*, 13(3), 169-177.
- Champagne, C., Soullignac, L., Marcotte, M., & Innocent, J.-P. (2003). Texture et évolution du pH de fromages de type Brie entreposés en atmosphère contrôlée. *Le Lait*, 83(2), 145-151.
- Cook, N. R., Cutler, J. A., Obarzanek, E., Buring, J. E., Rexrode, K. M., Kumanyika, S. K., Appel, L. J., & Whelton, P. K. (2007). Long term effects of dietary sodium reduction on cardiovascular disease outcomes: observational follow-up of the trials of hypertension prevention (TOHP). *BMJ*, 334(7599), 885-888.
- Cruz, A. G., Faria, J. A. F., Pollonio, M. A. R., Bolini, H. M. A., Celeghini, R. M. S., Granato, D., & Shah, N. P. (2011). Cheeses with reduced sodium content: Effects on functionality, public health benefits and sensory properties. *Trends in Food Science & Technology*, 22(6), 276-291.
- Dalgleish, D. G., & Corredig, M. (2012). The structure of the casein micelle of milk and its changes during processing. *Annual Review of Food Science and Technology*, 3(1), 449-467.
- Dangin, M., Guillet, C., Garcia-Rodenas, C., Gachon, P., Bouteloup-Demange, C., Reiffers-Magnani, K., Fauquant, J., Ballèvre, O., & Beaufrère, B. (2003). The rate of protein digestion affects protein gain differently during aging in humans. *The Journal of Physiology*, 549(2), 635-644.
- de Kruif, C. G. (1999). Casein micelle interactions. *International Dairy Journal*, 9(3-6), 183-188.
- De Souza Genaro, P., & Martini, L.A. (2010). Effect of protein intake on bone and muscle mass in the elderly. *Nutrition Reviews*, 68(10), 616-623.
- Demott, B. J., Hitchcock, J. P., & Sanders, O. G. (1984). Sodium concentration of selected dairy products and acceptability of a sodium substitute in Cottage cheese. *Journal of dairy science*, 67(7), 1539-1543.
- Denton, D., Weisinger, R., Mundy, N. I., Wickings, E. J., Dixon, A., Moisson, P., Pingard, A. M., Shade, R., Carey, D., Ardaillou, R., Paillard, F., Chapman, J., Thillet, J., & Baptiste Michel, J. (1995). The effect of increased salt intake on blood pressure of chimpanzees. *Nat Med*, 1(10), 1009-1016.
- Desmaures, N. (2014). Cheese - Mold-ripened varieties. In M. L. Tortorello (Ed.), *Encyclopedia of Food Microbiology (Second Edition)* (pp. 409-415). Oxford: Academic Press.
- Desmazeaud, M., J., Gripon, J.-C., Le Bars, D., & Bergere, J., L. (1976). Etude du rôle des micro-organismes et des enzymes au cours de la maturation des fromages. III. Influence des micro-organismes (*Streptococcus lactis*, *Penicillium caseicolum* et *P. roqueforti*). *Lait*, 56(557), 379-396.
- Desmond, E. (2006). Reducing salt: A challenge for the meat industry. *Meat Science*, 74(1), 188-196.

- Devine, A., Criddle, R. A., Dick, I. M., Kerr, D. A., & Prince, R. L. (1995). A longitudinal study of the effect of sodium and calcium intakes on regional bone density in postmenopausal women. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 62(4), 740-745.
- Doleyres, Y., & Lacroix, C. (2005). Technologies with free and immobilised cells for probiotic bifidobacteria production and protection. *International Dairy Journal*, 15(10), 973-988.
- Doyle, M. E., & Glass, K. A. (2010). Sodium reduction and its effect on food safety, food quality, and human health. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9(1), 44-56.
- Drake, M. A., Gerard, P. D., Truong, V. D., & Daubert, C. R. (1999). Relationship between instrumental and sensory measurements of cheese texture. *Journal of Texture Studies*, 30(4), 451-476.
- El-Bakry, M. (2012). Salt in cheese: A review. *Curr. Res. Dairy Sci*, 4(1), 1-5.
- El-Bakry, M., Duggan, E., O'Riordan, E. D., & O'Sullivan, M. (2011). Effect of cation, sodium or potassium, on casein hydration and fat emulsification during imitation cheese manufacture and post-manufacture functionality. *LWT - Food Science and Technology*, 44(10), 2012-2018.
- Elliott, P., Walker, L. L., Little, M. P., Blair-West, J. R., Shade, R. E., Lee, D. R., Rouquet, P., Leroy, E., Jeunemaitre, X., Ardaillou, R., Paillard, F., Meneton, P., & Denton, D. A. (2007). Change in salt intake affects blood pressure of chimpanzees: Implications for human populations. *Circulation*, 116(14), 1563-1568.
- Fairweather-Tait, S. J., & Southon, S. (2003). Bioavailability of nutrients. In C. Editor-in-Chief: Benjamin (Ed.), *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition* (2nd ed., pp. 478-484). Oxford: Academic Press.
- Fang, X. (2015). La digestibilité des fromages commerciaux : impact de la structure et de la texture des fromages. Thèse de Doctorat, Université Laval. Retrieved from <http://theses.ulaval.ca/archimede/meta/31700>.
- Fang, X., Rioux, L.-E., Labrie, S., & Turgeon, S. L. (2016a). Commercial cheeses with different texture have different disintegration and protein release rates during simulated in vitro digestion. *International Dairy Journal*, 56(May 2016), 169-178.
- Fang, X., Rioux, L.-E., Labrie, S., & Turgeon, S. L. (2016b). Disintegration and nutrients release from cheese with different textural properties during in vitro digestion. *Food Research International*, In press.
- Fischer, P. W. F., Vigneault, M., Huang, R., Arvaniti, K., & Roach, P. (2009). Sodium food sources in the Canadian diet. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, 34(5), 884-892.
- Fitzgerald, E., & Buckley, J. (1985). Effect of total and partial substitution of sodium chloride on the quality of Cheddar cheese. *Journal of dairy science*, 68(12), 3127-3134.
- Floury, J., Camier, B., Rousseau, F., Lopez, C., Tissier, J.-P., & Famelart, M.-H. (2009). Reducing salt level in food: Part 1. Factors affecting the manufacture of model cheese systems and their structure–texture relationships. *LWT - Food Science and Technology*, 42(10), 1611-1620.
- Fox, P. F., & McSweeney, P. L. H. (2004). Cheese: An Overview. In P. L. H. M. T. M. C. Patrick F. Fox & P. G. Timothy (Eds.), *Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology* (Vol. Volume 1, pp. 1-18): Academic Press.
- Franck, P., Moneret Vautrin, D. A., Dousset, B., Kanny, G., Nabet, P., Guénard-Bilbaut, L., & Parisot, L. (2002). The allergenicity of soybean-based products is modified by food technologies. *International Archives Of Allergy And Immunology*, 128(3), 212-219.
- Gillis, J.-C. (2004). *Manuel du salage en fromagerie - Théorie & pratiques*. Paris: Arilait Recherches.
- Gouvernement of Canada. (2013). Sodium: the basics. Retrieved January 7th 2016, from http://healthycanadians.gc.ca/eating-nutrition/healthy-eating-saine-alimentation/nutrients-nutriments/sodium/basics-savoir-eng.php?_ga=1.71708688.2056588976.1452199995
- Gouvernement of Canada. (2013). Food and drug regulations. Retrieved June 11th 2013, from http://laws-lois.justice.gc.ca/eng/regulations/C.R.C.%2C_c._87/
- Guinee, T. P., & Fox, P. F. (2004). Salt in cheese: Physical, chemical and biological aspects. In P. L. H. M. T. M. C. Patrick F. Fox & P. G. Timothy (Eds.), *Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology* (Vol. Volume 1, pp. 207-259): Academic Press.
- Guinee, T. P., & Sutherland, B. J. (2011). Cheese - Salting of cheese. In W. F. Editor-in-Chief: John (Ed.), *Encyclopedia of Dairy Sciences (Second Edition)* (pp. 595-606). San Diego: Academic Press.

- Guizani, N., Kasapis, S., Al-Attabi, Z. H., & Al-Ruzeiki, M. H. (2002). Microbiological, physicochemical, and biochemical changes during ripening of camembert cheese made of pasteurized cow's milk. *International Journal of Food Properties*, 5(3), 483-494.
- He, F. J., & MacGregor, G. A. (2007). Salt, blood pressure and cardiovascular disease. *Curr Opin Cardiol*, 22(4), 298-305.
- He, F. J., & MacGregor, G. A. (2008). A comprehensive review on salt and health and current experience of worldwide salt reduction programmes. *J Hum Hypertens*, 23(6), 363-384.
- Health Canada. (2010). *Sodium reduction strategy for Canada - Recommendations of the sodium working group*. Retrieved from http://www.hc-sc.gc.ca/fn-an/alt_formats/pdf/nutrition/sodium/strateg/reduct-strat-eng.pdf.
- Health Canada. (2012). *Guidance for the food industry on reducing sodium in processed foods*. Retrieved from <http://www.hc-sc.gc.ca/fn-an/legislation/guide-ld/2012-sodium-reduction-indust-eng.php>.
- Heeg, J. E., de Jong, P. E., van der Hem, G. K., & de Zeeuw, D. (1989). Efficacy and variability of the antiproteinuric effect of ACE inhibition by lisinopril. *Kidney Int*, 36(2), 272-279.
- Hélias, A., Mirade, P. S., & Corrieu, G. (2007). Modeling of Camembert-type cheese mass loss in a ripening chamber: Main biological and physical phenomena. *Journal of Dairy Science*, 90(11), 5324-5333.
- Hennequin, D., & Hardy, J. (1993). Evaluation instrumentale et sensorielle de certaines propriétés texturales de fromages à pâte molle. *International Dairy Journal*, 3(7), 635-647.
- Hursel, R., van der Zee, L., & Westerterp-Plantenga, M. S. (2010). Effects of a breakfast yoghurt, with additional total whey protein or caseinomacropptide-depleted α -lactalbumin-enriched whey protein, on diet-induced thermogenesis and appetite suppression. *British Journal of Nutrition*, 103(05), 775-780.
- IDF. (1991a). Chemical methods for evaluating proteolysis in cheese maturation - List of criteria for evaluation of accelerated ripening of cheese. *Bulletin of the international Dairy Federation* (Vol. 261). Belgium, Brussels: International Dairy Federation.
- IDF. (1991b). Rheological and fracture properties of cheese. *Bulletin of the international Dairy Federation* (Vol. 268). Brussels, Belgium: International Dairy Federation.
- IDF. (2002). Milk and products - determination of nitrogen content - routine method using combustion according to the Dumas principle. *Bulletin of the international Dairy Federation* (Vol. 185). Belgium, Brussels: International Dairy Federation.
- IDF. (2014). The importance of salt in the manufacture and ripening of cheese. *Bulletin of the international Dairy Federation* (Special Issue 1401), 92.
- Institut Fromages et Santé. (2012). Fromage - questions de santé. Retrieved November 18th 2013, from <http://www.produits-laitiers.com/questions-de-sante/>
- Institute of Medicine of the National Academy of Sciences. (2005). *Dietary reference intakes for water, potassium, sodium, chloride, and sulfate*: The National Academies Press.
- Intersalt Cooperative Research Group. (1988). Intersalt: an international study of electrolyte excretion and blood pressure. Results for 24 hour urinary sodium and potassium excretion. *BMJ*, 297(6644), 319-328.
- ISO/IDF. (2004). Cheese and processed cheese products - determination of fat content - gravimetric method (Reference method). ISO 1735 | IDF 005:2004. Brussels, Belgium: International Organization for Standardization.
- ISO/IDF. (2008). Processed cheese products - determination of nitrogen content and crude protein calculation - Kjeldahl method. ISO/TS 17837 | IDF/RM 025:2008. Geneva, Switzerland: International Organisation for Standardisation.
- Iwanczak, M., Reys, A., Wisniewska, K., Jarmul, I., & P., Kolakowskim. (1995). Possibility for increasing the potassium content in ripening cheese. *Milchwissenschaft*, 50(11), 619-622.
- Jenkins, D. J. A., Kendall, C. W. C., Augustin, L. S. A., Franceschi, S., Hamidi, M., Marchie, A., Jenkins, A. L., & Axelsen, M. (2002). Glycemic index: overview of implications in health and disease. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 76(1), 266S-273S.

- Jenkins, D. J., Wolever, T. M., Taylor, R. H., Barker, H., Fielden, H., Baldwin, J. M., Bowling, A. C., Newman, H. C., Jenkins, A. L., & Goff, D. V. (1981). Glycemic index of foods: a physiological basis for carbohydrate exchange. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 34(3), 362-366.
- Joffres, M. R., Campbell, N. R. C., Manns, B., & Tu, K. (2007). Estimate of the benefits of a population-based reduction in dietary sodium additives on hypertension and its related health care costs in Canada. *The Canadian journal of cardiology*, 23(6), 437-443.
- Johnson, M. E., Kapoor, R., McMahon, D. J., McCoy, D. R., & Narasimmon, R. G. (2009). Reduction of sodium and fat levels in natural and processed cheeses: Scientific and technological aspects. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 8(3), 252-268.
- Johnson, M., & Law, B. A. (2010). The origins, development and basic operations of cheesemaking technology *Technology of Cheesemaking* (pp. 68-97): Wiley-Blackwell.
- Joossens, J.V., Hill, M. J., Elliott, P., Stamler, R., Stamler, J., Lesaffre, E., Dyer, A., Nichols, R., Kesteloot, H., On behalf of European Cancer Prevention, & The Intersalt Cooperative Research Group. (1996). Dietary salt, nitrate and stomach cancer mortality in 24 countries. *International Journal of Epidemiology*, 25(3), 494-504.
- Jurado, E., Camacho, F., Luzón, G., Fernández-Serrano, M., & García-Román, M. (2006). Kinetic model for the enzymatic hydrolysis of tributyrin in O/W emulsions. *Chemical Engineering Science*, 61(15), 5010-5020.
- Kaplan, N. M. (2000). The dietary guideline for sodium: should we shake it up? No. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 71(5), 1020-1026.
- Karahadian, C., & Lindsay, R. C. (1984). Flavor and textural properties of reduced-sodium process American cheeses. *Journal of dairy science*, 67(9), 1892-1904.
- Karahadian, C., & Lindsay, R. C. (1987). Integrated roles of lactate, ammonia, and calcium in texture development of mold surface-ripened cheese. *Journal of dairy science*, 70(5), 909-918.
- Katsiari, M. C., Voutsinas, L. P., Alichanidis, E., & Roussis, I. G. (1997). Reduction of sodium content in Feta cheese by partial substitution of NaCl by KCl. *International Dairy Journal*, 7(6-7), 465-472.
- Katsiari, M. C., Voutsinas, L. P., Alichanidis, E., & Roussis, I. G. (1998). Manufacture of Kefalograviera cheese with less sodium by partial replacement of NaCl with KCl. *Food Chemistry*, 61(1-2), 63-70.
- Kaur, A., Bala, R., Singh, B., & Rehal, J. (2011). Effect of replacement of sodium chloride with mineral salts on rheological characteristics of wheat flour. *Am. J. Food Technol*, 6(8), 674-684.
- Kearney, P. M., Whelton, M., Reynolds, K., Muntner, P., Whelton, P. K., & He, J. (2005). Global burden of hypertension: analysis of worldwide data. *The Lancet*, 365(9455), 217-223.
- Kfoury, M., Mpagana, M., & Hardy, J. (1989). Influence de l'affinage sur les propriétés rhéologiques du camembert et du saint-paulin. *Lait*, 69(2), 137-149.
- Kindstedt, P. S., Kiely, L. J., & Gilmore, J. A. (1992). Variation in composition and functional properties within brine-salted Mozzarella cheese. *Journal of Dairy Science*, 75(11), 2913-2921.
- Kong, F., & Singh, R. P. (2008). Disintegration of solid foods in human stomach. *Journal of Food Science*, 73(5), R67-R80.
- Kong, F., & Singh, R. P. (2009). Digestion of raw and roasted almonds in simulated gastric environment. *Food Biophysics*, 4(4), 365-377.
- Kosikowski, F. V. (1983). Low sodium Cheddar cheeses through whole milk retentate supplementation. *Journal of Dairy Science*, 66(12), 2494-2500.
- Lairon, D., Play, B., & Jourdeuil-Rahmani, D. (2007). Digestible and indigestible carbohydrates: interactions with postprandial lipid metabolism. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 18(4), 217-227.
- Lamothe, S., Corbeil, M.-M., Turgeon, S. L., & Britten, M. (2012). Influence of cheese matrix on lipid digestion in a simulated gastro-intestinal environment. *Food & Function*, 3(7), 724-731.
- Le Graet, Y., & Brulé, G. (1993). Les équilibres minéraux du lait influence du pH et de la force ionique. *Lait*, 73(1), 51-60.
- Le Graet, Y., Lepienne, A., Brule, G., & Ducruet, P. (1983). Migration du calcium et des phosphates inorganiques dans les fromages à pâte molle de type Camembert au cours de l'affinage. *Lait*, 63(629-630), 317-332.

- Leclercq-Perlat, M.-N., Buono, F., Lambert, D., Latrille, E., Spinnler, H.-E., & Corrieu, G. (2004). Controlled production of Camembert-type cheeses. Part I: Microbiological and physicochemical evolutions. *Journal of Dairy Research*, 71(03), 346-354.
- Leclercq-Perlat, M. N., Sicard, M., Perrot, N., Trelea, I. C., Picque, D., & Corrieu, G. (2015). Temperature and relative humidity influence the ripening descriptors of Camembert-type cheeses throughout ripening. *Journal of Dairy Science*, 98(2), 1325-1335.
- Lenoir, J. (1963). Note sur la dégradation des protéides au cours de la maturation du Camembert. *Lait*, 43(423-424), 154-165.
- Lesage, L., Sauvageot, F., Voilley, A., & Lorient, D. (1992). Effect of sodium chloride concentration and ripening time on the sensory characteristics of camembert cheese with addition of magnesium. *Lait*, 72(1), 73-85.
- Lesage, L., Voilley, A., Lorient, D., & Bézard, J. (1993). Sodium chloride and magnesium chloride affected by ripening of Camembert cheese. *Journal of Food Science*, 58(6), 1303-1306.
- Lindsay, R. C., Hargett, S. M., & Bush, C. S. (1982). Effect of sodium/potassium (1:1) chloride and low sodium chloride concentrations on quality of Cheddar cheese. *Journal of Dairy Science*, 65(3), 360-370.
- Lucey, J. A., Johnson, M. E., & Horne, D. S. (2003). Invited review: Perspectives on the basis of the rheology and texture properties of cheese. *Journal of Dairy Science*, 86(9), 2725-2743.
- Luhovyy, B. L., Akhavan, T., & Anderson, G. H. (2007). Whey proteins in the regulation of food intake and satiety. *Journal of the American College of Nutrition*, 26(6), 704S-712S.
- MacGregor, K. J., Embleton, J. K., Lacy, J. E., Perry, E. A., Solomon, L. J., Seager, H., & Pouton, C. W. (1997). Influence of lipolysis on drug absorption from the gastro-intestinal tract. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 25(1), 33-46.
- Mahé, S., Messing, B., Thuillier, F., & Tomé, D. (1991). Digestion of bovine milk proteins in patients with a high jejunostomy. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 54(3), 534-538.
- Mattes, R D, & Donnelly, D. (1991). Relative contributions of dietary sodium sources. *Journal of the American College of Nutrition*, 10(4), 383-393.
- McSweeney, P. L. H., & Fox, P. F. (2004). Metabolism of residual lactose and of lactate and citrate. In P. L. H. M. T. M. C. Patrick F. Fox & P. G. Timothy (Eds.), *Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology* (Vol. 1, pp. 361-371): Academic Press.
- Meneton, P., Jeunemaitre, X., de Wardener, H. E., & Macgregor, G. A. (2005). Links between dietary salt intake, renal salt handling, blood pressure, and cardiovascular diseases. *Physiological Reviews*, 85(2), 679-715.
- Miguel, M., Gómez-Ruiz, J. Á., Recio, I., & Aleixandre, A. (2010). Changes in arterial blood pressure after single oral administration of milk-casein-derived peptides in spontaneously hypertensive rats. *Molecular Nutrition & Food Research*, 54(10), 1422-1427.
- Minekus, M., Alming, M., Alvito, P., Ballance, S., Bohn, T., Bourlieu, C., Carriere, F., Boutrou, R., Corredig, M., Dupont, D., Dufour, C., Egger, L., Golding, M., Karakaya, S., Kirkhus, B., Le Feunteun, S., Lesmes, U., Macierzanka, A., Mackie, A., Marze, S., McClements, D. J., Menard, O., Recio, I., Santos, C. N., Singh, R. P., Vegarud, G. E., Wickham, M. S. J., Weitschies, W., & Brodkorb, A. (2014). A standardised static in vitro digestion method suitable for food - an international consensus. *Food & Function*, 5(6), 1113-1124.
- Minekus, M., Marteau, P., Havenaar, R., & Veld, J. H. (1995). A multi-compartmental dynamic computer-controlled model simulating the stomach and small intestine. *ATLA*, 23, 197-209.
- Mistry, V. V., & Kasperson, K. M. (1998). Influence of salt on the quality of reduced fat Cheddar cheese. *Journal of dairy science*, 81(5), 1214-1221.
- Molander, E., Kristiansen, K.R., & Werner, H. (1990). Instrumental and sensoric measurement of Brie texture. *Milchwissenschaft*, 45(9), 589-593.
- Møller, K. K., Rattray, F. P., Bredie, W. L. P., Høier, E., & Ardö, Y. (2013). Physicochemical and sensory characterization of Cheddar cheese with variable NaCl levels and equal moisture content. *Journal of Dairy Science*, 96(4), 1953-1971.

- Norton, I., Moore, S., & Fryer, P. (2007). Understanding food structuring and breakdown: engineering approaches to obesity. *Obesity reviews : an official journal of the International Association for the Study of Obesity*, 8 Suppl 1, 83-88.
- O'Brien, N. M., & O'Connor, T. P. (2004). Nutritional aspects of cheese. In P. L. H. M. T. M. C. Patrick F. Fox & P. G. Timothy (Eds.), *Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology* (Vol. 1, pp. 573-581): Academic Press.
- O'Callaghan, D. J., & Guinee, T. P. (2004). Rheology and texture of cheese. In P. L. H. M. T. M. C. Patrick F. Fox & P. G. Timothy (Eds.), *Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology* (Vol. 1, pp. 511-540): Academic Press.
- O'Keeffe, A. M., Fox, P. F., & Daly, C. (1978). Proteolysis in Cheddar cheese: role of coagulant and starter bacteria. *Journal of Dairy Research*, 45(03), 465-477.
- O'Shaughnessy, K. M., & Karet, F. E. (2004). Salt handling and hypertension. *The Journal of Clinical Investigation*, 113(8), 1075-1081.
- Parada, J., & Aguilera, J. M. (2007). Food microstructure affects the bioavailability of several nutrients. *Journal of Food Science*, 72(2), R21-R32.
- Pastorino, A. J., Hansen, C. L., & McMahon, D. J. (2003). Effect of salt on structure-function relationships of cheese. *Journal of Dairy Science*, 86(1), 60-69.
- Patton, J. S., Vetter, R. D., Hamosh, M., Borgstrom, B., Lindstrom, M., & Carey, M. C. (1985). The light-microscopy of triglyceride digestion. *Food Microstructure*, 4(1), 29-41.
- Penz, E. D., Joffres, M. R., & Campbell, N. R. C. (2008). Reducing dietary sodium and decreases in cardiovascular disease in Canada. *The Canadian journal of cardiology*, 24(6), 497-501.
- Phillips, S.M., Tang, J.E., & Moore, D.R. (2009). The role of milk- and soy-based protein in support of muscle protein synthesis and muscle protein accretion in young and elderly persons. *Journal of the American College of Nutrition*, 28(4), 343-354.
- Picque, D., Leclercq-Perlat, M. N., & Corrieu, G. (2006). Effects of atmospheric composition on respiratory behavior, weight loss, and appearance of Camembert-type cheeses during chamber ripening. *Journal of Dairy Science*, 89(8), 3250-3259.
- Picque, D., Leclercq-Perlat, M. N., Guillemain, H., Perret, B., Cattenoz, T., Provost, J. J., & Corrieu, G. (2010). Camembert-type cheese ripening dynamics are changed by the properties of wrapping films. *Journal of Dairy Science*, 93(12), 5601-5612.
- Pihlanto-Leppälä, A., Paakkari, I., Rinta-Koski, M., & Antila, P. (1997). Bioactive peptide derived from in vitro proteolysis of bovine β -lactoglobulin and its effect on smooth muscle. *Journal of Dairy Research*, 64(01), 149-155.
- Public Health Agency of Canada. (2009). *Suivi des maladies du coeur et des accidents vasculaires cérébraux au Canada*. Retrieved from <http://www.phac-aspc.gc.ca/publicat/2009/cvd-avc/index-fra.php>.
- Reddy, K.A., & Marth, E.H. (1993). Proteolysis in Cheddar cheese made with sodium chloride, potassium chloride or mixtures of sodium and potassium chloride. *LWT - Food Science and Technology*, 26(5), 434-442.
- Reddy, K.A., & Marth, E.H. (1995). Microflora of Cheddar cheese made with sodium chloride, potassium chloride or mixtures of sodium and potassium chloride. *Journal of Food Protection*, 58(1), 54-61.
- Rinaldi, L., Gauthier, S. F., Britten, M., & Turgeon, S. L. (2014). In vitro gastrointestinal digestion of liquid and semi-liquid dairy matrixes. *LWT - Food Science and Technology*, 57(1), 99-105.
- Rioux, L.-E., & Turgeon, S. L. (2012). The ratio of casein to whey protein impacts yogurt digestion in vitro. *Food Digestion*, 3(1-3), 25-35.
- Rulikowska, A., Kilcawley, K. N., Doolan, I. A., Alonso-Gomez, M., Nongonierma, A. B., Hannon, J. A., & Wilkinson, M. G. (2013). The impact of reduced sodium chloride content on Cheddar cheese quality. *International Dairy Journal*, 28(2), 45-55.
- Salahdeen, H.M., & Alada, A.R.A. (2007). Cardiovascular response to angiotensin II and captopril in normal and diabetic rats loaded with salt. *J. Medical Sci*, 7(2), 187-194.
- Schlessner, J. E., Schmidt, S. J., & Speckman, R. (1992). Characterization of chemical and physical changes in Camembert cheese during ripening. *Journal of dairy science*, 75(7), 1753-1760.

- Schroeder, C. L., Bodyfelt, F. W., Wyatt, C. J., & McDaniel, M. R. (1988). Reduction of sodium chloride in Cheddar cheese: Effect on sensory, microbiological, and chemical properties. *Journal of dairy science*, 71(8), 2010-2020.
- Sensoy, I. (2014). A review on the relationship between food structure, processing, and bioavailability. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 54(7), 902-909.
- Singh, H., Ye, A., & Ferrua, M. J. (2015). Aspects of food structures in the digestive tract. *Current Opinion in Food Science*, 3, 85-93.
- Sousa, M. J., Ardö, Y., & McSweeney, P. L. H. (2001). Advances in the study of proteolysis during cheese ripening. *International Dairy Journal*, 11(4-7), 327-345.
- Spinnler, H. E., & Gripon, J. C. (2004). Surface mould-ripened cheeses. In P. L. H. M. T. M. C. Patrick F. Fox & P. G. Timothy (Eds.), *Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology* (Vol. 2, pp. 157-174): Academic Press.
- St-Gelais, D., Haché, S., & Gros-Louis, M. (1992). Combined effects of temperature, acidification, and diafiltration on composition of skim milk retentate and permeate. *Journal of Dairy Science*, 75(5), 1167-1172.
- Statistics Canada. (2001). *Food expenditure in Canada*. Canada: Retrieved from <http://www.statcan.gc.ca/pub/62-554-x/62-554-x2001001-eng.pdf>.
- Statistics Canada. (2013). Ranking and number of deaths for the 10 leading causes, Canada, 2000 and 2009. Retrieved November 5th 2013, from <http://www.statcan.gc.ca/pub/84-215-x/2012001/tableau-tableau/tbl001-eng.htm>
- Strazzullo, P., D'Elia, L., Kandala, N.-B., & Cappuccio, F. P. (2009). Salt intake, stroke, and cardiovascular disease: meta-analysis of prospective studies. *BMJ*, 339, 1-9.
- Sultanpur, C.M., Kumar, S.V., & Deepa, K. (2011). Vaccines for hypertension disorder beneficial or detrimental. *Singapore Journal of Scientific Research*, 1(1), 10.
- Swift, P. A., Markandu, N. D., Sagnella, G. A., He, F. J., & MacGregor, G. A. (2005). Modest salt reduction reduces blood pressure and urine protein excretion in black hypertensives: A randomized control trial. *Hypertension*, 46(2), 308-312.
- Tanase, C. M., Koski, K. G., Laffey, P. J., Cooper, M. J., & Cockell, K. A. (2011). Canadians continue to consume too much sodium and not enough potassium. *Can J Public Health*, 102(3), 164-168.
- Texture Technologies Corp, & Stable Micro Systems. (2015). An overview of texture profile analysis (TPA). Retrieved October 28th 2015, from <http://texturetechnologies.com/texture-profile-analysis/texture-profile-analysis.php>
- Tomé, D., Schwarz, J., Darcel, N., & Fromentin, G. (2009). Protein, amino acids, vagus nerve signaling, and the brain. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 90(3), 838S-843S.
- Touchette, M. (2016). Effet de la réduction et de la substitution du NaCl dans le Camembert sur la croissance de la microflore fongique d'affinage. M. Sc., Université Laval. Québec, Canada. 138.
- Tsugane, S., Sasazuki, S., Kobayashi, M., & Sasaki, S. (2004). Salt and salted food intake and subsequent risk of gastric cancer among middle-aged Japanese men and women. *Br J Cancer*, 90(1), 128-134.
- Tuomilehto, J., Jousilahti, P., Rastenyte, D., Moltchanov, V., Tanskanen, A., Pietinen, P., & Nissinen, A. (2001). Urinary sodium excretion and cardiovascular mortality in Finland: a prospective study. *The Lancet*, 357(9259), 848-851.
- Turgeon, S. L., & Rioux, L.-E. (2011). Food matrix impact on macronutrients nutritional properties. *Food Hydrocolloids*, 25(8), 1915-1924.
- Vassal, L., & Gripon, J. C. (1984). L'amertume des fromages à pâte molle de type Camembert: rôle de la présure et de *Penicillium caseicolum*, moyens de la contrôler. *Lait*, 64(643-644), 397-417.
- Vassal, L., Monnet, V., Le Bars, D., Roux, C., & Gripon, J. C. (1986). Relation entre le pH, la composition chimique et la texture des fromages de type Camembert. *Lait*, 66(4), 341-351.
- Veldhorst, M., Smeets, A., Soenen, S., Hochstenbach-Waelen, A., Hursel, R., Diepvens, K., Lejeune, M., Luscombe-Marsh, N., & Westerterp-Plantenga, M. (2008). Protein-induced satiety: Effects and mechanisms of different proteins. *Physiology & Behavior*, 94(2), 300-307.

- Versantvoort, C. H. M., Oomen, A. G., Van de Kamp, E., Rompelberg, C. J. M., & Sips, A. J. A. M. (2005). Applicability of an in vitro digestion model in assessing the bioaccessibility of mycotoxins from food. *Food and Chemical Toxicology*, 43(1), 31-40.
- Westerterp-Plantenga, M. S., Nieuwenhuizen, A., Tomé, D., Soenen, S., & Westerterp, K.R. (2009). Dietary protein, weight loss, and weight maintenance. *Annual Review of Nutrition*, 29(1), 21-41.
- Wiechelman, K. J., Braun, R. D., & Fitzpatrick, J. D. (1988). Investigation of the bicinchoninic acid protein assay: Identification of the groups responsible for color formation. *Analytical Biochemistry*, 175(1), 231-237.
- World Health Organization. (2013). A global brief on hypertension - Silent killer, global public health crisis. (pp. 40). Geneva, Switzerland.
- World Health Organization, & Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2003). Diet, nutrition and the prevention of chronic diseases: report of a joint WHO/FAO expert consultation (pp. 11). Geneva, Switzerland.

Annexes du Chapitre 2.

A2-1.Composition des fromages sur poids sec

Tableau 2-4. Composition sur poids sec des fromages Brie expérimentaux à J28.

Composition	CTL commercial ¹	CTL ²	R ²	S ²
Humidité (g/100 g fromage)	47,6 *	47,3 ± 0,2 ^a	47,8 ± 2,7 ^a	47,4 ± 0,7 ^a
Protéines (g/100 g ST)	36,1 *	34,6 ± 0,8 ^a	34,7 ± 0,3 ^a	33,5 ± 1,9 ^a
Matières grasses (g/100 g ST)	54,4 *	57,5 ± 0,8 ^a	57,7 ± 0,6 ^a	57,5 ± 1,2 ^a
Cendres (g/100 g ST)	5,9 *	5,7 ± 0,3 ^a	5,2 ± 0,4 ^a	5,7 ± 0,4 ^a
Calcium (mg/ 100 g ST)	973 *	893 ± 43 ^a	962 ± 65 ^a	915 ± 29 ^a
Phosphore (mg/ 100 g ST)	ND	613 ± 20 ^a	654 ± 34 ^a	629 ± 15 ^a
Potassium (mg/ 100 g ST)	ND	152 ± 13 ^b	189 ± 58 ^b	490 ± 76 ^a
Sodium (mg/ 100 g ST)	1166 *	1003 ± 55 ^a	750 ± 92 ^b	797 ± 104 ^b

¹ Données fournies par l'entreprise. ² Données de 4 répétitions (n = 4). * Calculées selon les données fournies par l'entreprise. Des lettres différentes sur une même rangée indiquent des différences significatives avec une valeur p < 0,05. CTL :fromage contrôle à condition saline standard ; R : fromage à condition saline réduite en Na par réduction nette ; S : fromage à condition saline réduite en sodium par substitution au KCl

A2-2. Teneurs en azote des fromages Brie expérimentaux

Tableau 2-5. Contenu en azote total (NT) des fromages Brie expérimentaux pendant l'affinage.

Jour	Teneur en NT (g/100g de fromage)		
	CTL ¹	R ¹	S ¹
14 ^B	2,79 ± 0,10 ^b	2,83 ± 0,05 ^b	2,84 ± 0,12 ^b
21 ^B	2,79 ± 0,13 ^b	2,86 ± 0,05 ^b	2,87 ± 0,04 ^b
30 ^B	2,86 ± 0,07 ^b	2,84 ± 0,15 ^b	2,76 ± 0,18 ^b
42 ^A	2,92 ± 0,14 ^a	2,95 ± 0,08 ^a	2,91 ± 0,14 ^a

¹ Moyenne ± écart-type de 4 répétitions (n = 4). Les différentes lettres en minuscule en exposant d'une même rangée signifient une différence entre les fromages et les différentes lettres en majuscules en exposant entre les rangées indiquent des différences significatives entre les jours d'affinage (p < 0,05). CTL : fromage contrôle à condition saline standard ; R : fromage à condition saline réduite en Na par réduction nette ; S : fromage à condition saline réduite en sodium par substitution au KCl.

Tableau 2-6. Contenu en azote soluble dans l'eau (NSE) des fromages Brie expérimentaux pendant l'affinage.

Jour	Teneur en NSE (g/100g de fromage)		
	CTL ¹	R ¹	S ¹
14 ^D	0,62 ± 0,03 ^d	0,653 ± 0,05 ^d	0,64 ± 0,05 ^d
21 ^C	0,83 ± 0,01 ^c	0,89 ± 0,13 ^c	0,81 ± 0,06 ^c
28 ^B	0,91 ± 0,06 ^b	1,02 ± 0,14 ^b	0,95 ± 0,09 ^b
42 ^A	1,11 ± 0,13 ^a	1,22 ± 0,21 ^a	1,12 ± 0,16 ^a

¹ Moyenne ± écart-type de 4 répétitions (n = 4). Les différentes lettres en minuscule en exposant d'une même rangée signifient une différence entre les fromages et les différentes lettres en majuscules en exposant entre les rangées indiquent des différences significatives entre les jours d'affinage (p < 0,05). CTL :fromage contrôle à condition saline standard ; R : fromage à condition saline réduite en Na par réduction nette ; S : fromage à condition saline réduite en sodium par substitution au KCl.

Tableau 2-7. Contenu en azote soluble dans le TCA des fromages Brie expérimentaux pendant l'affinage.

Jour	Teneur en NSTCA (g/100g de fromage)		
	CTL ¹	R ¹	S ¹
14 ^C	0,29 ± 0,08 ^c	0,32 ± 0,08 ^c	0,29 ± 0,04 ^c
21 ^B	0,41 ± 0,04 ^b	0,48 ± 0,13 ^b	0,42 ± 0,09 ^b
28 ^A	0,45 ± 0,07 ^a	0,58 ± 0,14 ^a	0,49 ± 0,10 ^a
42 ^A	0,44 ± 0,06 ^a	0,65 ± 0,16 ^a	0,48 ± 0,05 ^a

¹ Moyenne ± écart-type de 4 répétitions (n=4). Les différentes lettres en minuscule en exposant d'une même rangée signifie une différence entre les fromages et les différentes lettres en majuscules en exposant entre les rangées indiquent des différences significatives entre les jours d'affinage (p < 0,05). CTL : condition saline standard; R : condition saline réduite en Na par réduction nette; S : condition saline réduite en sodium par substitution au KCl.

A2-3. Analyse du profil textural des fromages Brie expérimentaux pendant l'affinage

Tableau 2-8. Fermeté, cohésion, capacité gommante, résilience et adhésion des fromages Brie expérimentaux pendant l'affinage.

Paramètres	Jour	CTL	R	S
Fermeté (Newton)	14 ^A	1,38 ± 0,32 ^a	1,50 ± 0,23 ^a	1,44 ± 0,35 ^a
	21 ^B	1,20 ± 0,36 ^b	1,36 ± 0,22 ^b	1,20 ± 0,37 ^b
	28 ^A	1,64 ± 0,18 ^a	1,50 ± 0,01 ^a	1,71 ± 0,04 ^a
	42 ^B	1,44 ± 0,19 ^b	1,35 ± 0,37 ^b	1,06 ± 0,35 ^b
Cohésion (sans dimension)	14 ^C	0,50 ± 0,11 ^c	0,42 ± 0,10 ^c	0,49 ± 0,07 ^c
	21 ^B	0,55 ± 0,09 ^b	0,45 ± 0,09 ^b	0,56 ± 0,11 ^b
	28 ^{BC}	0,46 ± 0,04 ^{bc}	0,40 ± 0,04 ^{bc}	0,48 ± 0,05 ^{bc}
	42 ^A	0,60 ± 0,01 ^a	0,56 ± 0,11 ^a	0,64 ± 0,13 ^a
Capacité gommante (Newton)	14 ^A	0,68 ± 0,18 ^a	0,64 ± 0,20 ^a	0,71 ± 0,18 ^a
	21 ^A	0,63 ± 0,11 ^a	0,61 ± 0,16 ^a	0,64 ± 0,12 ^a
	28 ^A	0,76 ± 0,14 ^a	0,60 ± 0,06 ^a	0,83 ± 0,10 ^a
	42 ^A	0,86 ± 0,12 ^a	0,73 ± 0,07 ^a	0,65 ± 0,09 ^a
Résilience (sans dimension)	14 ^A	0,18 ± 0,05 ^a	0,29 ± 0,27 ^a	0,18 ± 0,03 ^a
	21 ^A	0,19 ± 0,03 ^a	0,28 ± 0,22 ^a	0,19 ± 0,03 ^a
	28 ^A	0,15 ± 0,03 ^a	0,13 ± 0,02 ^a	0,16 ± 0,02 ^a
	42 ^B	0,20 ± 0,01 ^b	0,17 ± 0,02 ^b	0,18 ± 0,01 ^b
Adhésion (Newton/secondes)	14 ^C	-0,18 ± 0,01 ^c	-0,18 ± 0,03 ^c	-0,16 ± 0,02 ^c
	21 ^B	-0,20 ± 0,01 ^b	-0,20 ± 0,02 ^b	-0,23 ± 0,09 ^b
	28 ^B	-0,22 ± 0,04 ^b	-0,19 ± 0,03 ^b	-0,25 ± 0,02 ^b
	42 ^A	-0,33 ± 0,04 ^a	-0,52 ± 0,15 ^a	-0,52 ± 0,30 ^a

Moyenne ± écart-type de 4 répétitions (n = 4) pour les jours 14 et 21. Moyenne ± écart-type de 2 répétitions (n = 2) pour les jours 28 et 42. Les différentes lettres en minuscules en exposant sur une même ligne indiquent des différences significatives entre les fromages et les différentes lettres en majuscules en exposant entre les rangées d'un même paramètre de TPA indiquent une différence significative entre les jours d'affinages (p < 0,05). CTL : fromage contrôle à condition saline standard; R : fromage à condition saline réduite en Na par réduction nette; S : fromage à condition saline réduite en sodium par substitution au KCl.

A2-4. Corrélations entre le degré de protéolyse et les paramètres de texture des fromages Brie expérimentaux pendant l'affinage

Tableau 2-9. Corrélations (valeur de probabilité) entre le degré de protéolyse et la texture pendant l'affinage.

Paramètres de texture	Corrélation (valeur de p) du degré de protéolyse en fonction du temps d'affinage (jours)			
	J14	J21	J28	J42
Fermeté	-0,55739 (0,0597)	-0,51253 (0,0884)	0,21206 (0,6867)	-0,48625 (0,3281)
Cohésion	0,16497 (0,6084)	0,22814 (0,4757)	0,37189 (0,4679)	0,62777 (0,1820)
Capacité gommante	-0,28824 (0,3636)	-0,42671 (0,1665)	0,32033 (0,5359)	-0,21972 (0,6757)
Résilience	0,17230 (0,5923)	0,19567 (0,5422)	0,52123 (0,2890)	0,25537 (0,6253)
Adhésion	0,27650 (0,6843)	0,06694 (0,8363)	0,13998 (0,7914)	-0,67478 (0,1415)

Il y a une corrélation significative lorsque la valeur de probabilité est inférieure à 0,05.

Annexes du Chapitre 3.

A3-1. Broyage du fromage Brie pour la digestion *in vitro*

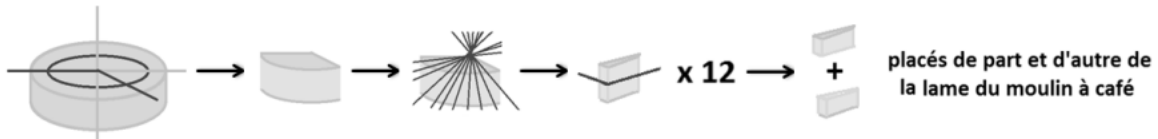


Figure 3-6. Schéma de la préparation du fromage Brie pour la digestion *in vitro*.

Le 3/8 d'une meule de 870 g est prélevé dont 3 cm du rebord a été enlevé à l'aide d'un emporte-pièce. Le centre est coupé en 12 pointes. Chaque pointe est coupée en deux et ces morceaux sont placés de part et d'autre de la lame du moulin à café pour être broyés (entre 15 et 20 pulsations). Le fromage ainsi broyé est retiré à l'aide d'une spatule en silicone et est placé dans un bécher recouvert d'un papier d'aluminium et d'un élastique pour refermer le bécher et éviter le dessèchement de la pâte. Lorsque toutes les pointes sont ainsi broyées et ajoutées au bécher, le tout est bien mélangé et forme une pâte plutôt homogène. Lors du prélèvement de l'échantillon, il faut faire des petites boulettes à l'aide de 2 spatules d'environ 1 cm³ (n'a pas été mesuré). Le broyage du fromage permet de former une pâte et d'imiter la texture du fromage Brie lorsqu'il est avalé. Les éléments de la figure ne sont pas à l'échelle.

A3-2. Recettes des jus digestifs utilisés pour la digestion *in vitro* des fromages Brie expérimentaux

Tableau 3-2. Composition et concentration finale des constituants des jus digestifs utilisés pour la digestion *in vitro* des fromages Brie expérimentaux¹.

Constituants	Unités	Solutions			
		Jus buccaux	Jus gastriques	Jus duodénaux	Jus biliaires
CaCl ₂	mmol L ⁻¹	-	3,601	1,800	2,000
HCl	mmol L ⁻¹	-	0,066	0,002	0,002
KCl	mmol L ⁻¹	12,019	11,057	7,572	5,048
KH ₂ PO ₄	mmol L ⁻¹	-	-	0,588	-
KSCN	mmol L ⁻¹	2,058	-	-	-
MgCl ₂	mmol L ⁻¹	-	-	0,525	-
NaCl	mmol L ⁻¹	5,099	47,095	119,986	89,990
NaH ₂ PO ₄	mmol L ⁻¹	7,401	2,220	-	-
NaHCO ₃	mmol L ⁻¹	20,164	-	40,329	68,861
NaSO ₄	mmol L ⁻¹	4,013	-	-	-
NH ₄ Cl	mmol L ⁻¹	-	5,721	-	-
Urée	mmol L ⁻¹	3,330	1,415	1,665	4,163
Glucose	mmol L ⁻¹	-	3,608	-	-
Acide glucoronique	mmol L ⁻¹	-	0,103	-	-
Glucoséamine hydrochloride	mmol L ⁻¹	-	1,530	-	-
Acide urique	g L ⁻¹	0,015	-	-	-
BSA	g L ⁻¹	-	1,000	1,000	1,800
Mucine	g L ⁻¹	0,025	3,000	-	-
α-amylase	g L ⁻¹	0,290	-	-	-
Pepsine	g L ⁻¹	-	2,500	-	-
Pancréatine	g L ⁻¹	-	-	9,000	-
Lipase	g L ⁻¹	-	-	1,500	-
Bile	g L ⁻¹	-	-	-	30,000
pH		6,80 ± 0,20	1,30 ± 0,20	8,10 ± 0,20	8,20 ± 0,20

¹Adapté de Rinaldi et coll. (2014) dont l'auteure réfère le lecteur aux travaux de Versantvoort et coll. (2005) pour davantage d'informations.

A3-3. Paramètres de la digestion *in vitro* des fromages Brie expérimentaux

Tableau 3-3. Paramètres utilisés pendant la digestion *in vitro* des fromages Brie expérimentaux dans pour chaque étape de digestion étudiée^{1,2}.

Paramètres	Buccale	Gastrique	Duodénale
Fromage (g)	36,0 ± 0,1	36,0 ± 0,1	18,0 ± 0,1
Température de digestion (°C)	37,0 ± 0,5	37,0 ± 0,5	37,0 ± 0,5
Étape buccale			
pH	6,9	6,9	6,9
Jus buccal (mL)	T _{0 min} = 24	T _{0 min} = 24	T _{0 min} = 12
Vitesse de pré-agitation (s ⁻¹)	75	75	75
Durée de la pré-agitation (min)	0,3 (20 sec)	0,3 (20 sec)	0,3 (20 sec)
Vitesse d'agitation (s ⁻¹)	100	100	100
Durée (min)	2	2	2
Étape gastrique			
pH		2-3	2-3
Contrôle du pH		T _{0 à 5 min} = 6,5 T _{5 à 10 min} = 6,5 à 6,0 T _{10 à 20 min} = 6,0 à 5,0 T _{20 à 30 min} = 5,0 à 2,5 T _{30 à 60 min} = 2,5	T _{0 à 5 min} = 6,5 T _{5 à 10 min} = 6,5 à 6,0 T _{10 à 20 min} = 6,0 à 5,0 T _{20 à 30 min} = 5,0 à 2,5 T _{30 à 120 min} = 2,5
Jus gastrique (mL)		T _{0 min} = 42 T _{60 min} = 6	T _{0 min} = 21 T _{60 min} = 3
Volume total de HCl 10 M (mL)		T _{0-30 min} = 0,8 ± 0,4 T _{0-60 min} = 1,3 ± 0,1 T _{0-120 min} = 1,5 ± 0,1	T _{0-120 min} = 0,7 ± 0,1
Vitesse de pré-agitation (s ⁻¹)		75	75
Durée de la pré-agitation (min)		0,5	0,5
Vitesse d'agitation (s ⁻¹)		30	30
Durée (min)		30, 60 ou 120	120
Étape duodénale			
pH			6-7
Jus duodéal (mL)			T _{0 min} = 36
NaHCO ₃ en poudre (g)			T _{0 min} = 0,4
NaHCO ₃ 1 M (mL)			T _{0 min} = 4
Volume total de NaOH 5 M (mL)			T _{120-180 min} = 2,3 ± 0,1
Vitesse de pré-agitation (s ⁻¹)			30
Durée de la pré-agitation (min)			0,5
Vitesse d'agitation (s ⁻¹)			30
Durée (min)			60

¹Tableau modifié de Fang (2015). ²La digestion (étapes ND, O2, G30, G60 et G120) des fromages expérimentaux a été effectuée autour du J34 ± 2. La digestion duodénale des 3 fromages a été effectuée la même journée autour de J36 ± 1.

A3-4. Programmation pour contrôler le pH durant la digestion *in vitro*

Tableau 3-4. Programmation du titrateur « *Mettler Toledo T90 Titration Excellence 4.00* » (Schwerzenbach, Suisse) pour contrôler le pH durant les étapes gastrique et duodénale de la digestion *in vitro* des fromages Brie expérimentaux.

Programmation au titrateur	Étapes de digestion			
	0-30 min	Gastrique 0-60 min	0-120 min	Duodénale 0-120 min
1- Désignation				
Type	Titrage général T70 / T90	Titrage général T70 / T90	Titrage général T70 / T90	Titrage général T70 / T90
Compatible avec				
ID de méthode	rheoCHVG30	rheoCHVG60	rheoCHVG120	rheoCHVG120pourDUO
Désignation	Stating	Stating	Stating	Stating
Auteur	LabX-Light	LabX-Light	LabX-Light	LabX-Light
Date/heure	2014-07-28 10:27:11	2014-07-28 09:17:11	2014-07-15 14:12:41	2014-07-28 09:34:07
Modifié le	2014-07-28 10:27:11	2014-07-28 09:34:51	2014-07-28 09:33:33	2014-07-28 13:31:33
Modifié par	LabX-Light	LabX-Light	LabX-Light	LabX-Light
Protéger	Non	Non	Non	Non
SOP	Aucun	Aucun	Aucun	Aucun
2- Échantillon				
Nombre d'ID	1	1	1	1
ID 1	--	--	--	--
Mode d'entrée	Volume fixe	Volume fixe	Volume fixe	Volume fixe
Volume [mL]	72	72	72	72
Masse volumique [g mL ⁻¹]	1	1	1	1
Facteur de correction	1.0	1.0	1.0	1.0
Température [°C]	37	37	37	37
3- Poste de titrage (Poste manuel)				
Type	Poste manuel	Poste manuel	Poste manuel	Poste manuel
Poste de titrage	Manual stand 1	Manual stand 1	Manual stand 1	Manual stand 1
4- Agiter				
Vitesse [%]	0	0	0	0
Durée [secondes]	0	0	0	0
Condition	Non	Non	Non	Non
5- Titrage (EP) [1] (de 0-5 min pH 6,5)				
Réactif				
Réactif	HCl	HCl	HCl	HCl
Concentration [mol L ⁻¹]	10	10	10	10
Addition continue	Non	Non	Non	Non
Capteur				
Type	pH	pH	pH	pH
Capteur	SURFACE	SURFACE	SURFACE	SURFACE
Unité	pH	pH	pH	pH
Saisie de la température				
Saisie de la température	Non	Non	Non	Non
Agiter				
Vitesse [%]	0	0	0	0
Prétitrage				
Prétitrage	Non	Non	Non	Non
Prédosage				
Mode	Aucun	Aucun	Aucun	Aucun
Temps d'attentes [s]	0	0	0	0
Régulation				
Potentiel de consigne [pH]	6,5	6,5	6,5	6,5
Plage de régulation [pH]	0,2	0,2	0,2	0,2
Tendance	Négative	Négative	Négative	Négative
Taux de dosage (max) [mL min ⁻¹]	0,10	0,10	0,10	0,10
Taux de dosage (min) [µL min ⁻¹]	10	10	10	10
Surveillance				
Surveillance	Non	Non	Non	Non
Arrêt				

A Vmax [10]	10,0	10,0	10,0	10,0
À partir de t(min)	Non	Non	Non	Non
Pour t(max)	Oui	Oui	Oui	Oui
t(max) [min]	5	5	5	5
Après la durée de régulation	Non	Non	Non	Non
Au taux minimal	Non	Non	Non	Non
<i>Enregistrement de la valeur mesurée</i>				
Intervalle [s]	1	1	1	1
Condition de départ	Aucun	Aucun	Aucun	Aucun
<i>Condition</i>				
Condition	Non	Non	Non	Non
6- Titration (EP) [2] (de 5-10 min pH 6,5-6,0)				
<i>Réactif</i>				
Réactif	HCl	HCl	HCl	HCl
Concentration [mol L ⁻¹]	10	10	10	10
Addition continue	Non	Non	Non	Non
<i>Capteur</i>				
Type	pH	pH	pH	pH
Capteur	SURFACE	SURFACE	SURFACE	SURFACE
Unité	pH	pH	pH	pH
<i>Saisie de la température</i>				
Saisie de la température	Non	Non	Non	Non
<i>Agiter</i>				
Vitesse [%]	0	0	0	0
<i>Prétitrage</i>				
Prétitrage	Non	Non	Non	Non
<i>Prédosage</i>				
Mode	Aucun	Aucun	Aucun	Aucun
Temps d'attentes [s]	0	0	0	0
<i>Régulation</i>				
Potentiel de consigne [pH]	6,0	6,0	6,0	6,0
Plage de régulation [pH]	0,2	0,2	0,2	0,2
Tendance	Négative	Négative	Négative	Négative
Taux de dosage (max) [mL min ⁻¹]	0,15	0,15	0,15	0,15
Taux de dosage (min) [µL min ⁻¹]	10	10	10	10
<i>Surveillance</i>				
Surveillance	Non	Non	Non	Non
<i>Arrêt</i>				
A Vmax [10]	10,0	10,0	10,0	10,0
À partir de t(min)	Non	Non	Non	Non
Pour t(max)	Oui	Oui	Oui	Oui
t(max) [min]	5	5	5	5
Après la durée de régulation	Non	Non	Non	Non
Au taux minimal	Non	Non	Non	Non
<i>Enregistrement de la valeur mesurée</i>				
Intervalle [s]	1	1	1	1
Condition de départ	Aucun	Aucun	Aucun	Aucun
<i>Condition</i>				
Condition	Non	Non	Non	Non
7- Titration (EP) [3] (de 10-20 min pH 6,0-5,0)				
<i>Réactif</i>				
Réactif	HCl	HCl	HCl	HCl
Concentration [mol L ⁻¹]	10	10	10	10
Addition continue	Non	Non	Non	Non
<i>Capteur</i>				
Type	pH	pH	pH	pH
Capteur	SURFACE	SURFACE	SURFACE	SURFACE
Unité	pH	pH	pH	pH
<i>Saisie de la température</i>				
Saisie de la température	Non	Non	Non	Non
<i>Agiter</i>				
Vitesse [%]	0	0	0	0
<i>Prétitrage</i>				
Prétitrage	Non	Non	Non	Non
<i>Prédosage</i>				
Mode	Aucun	Aucun	Aucun	Aucun
Temps d'attentes [s]	0	0	0	0
<i>Régulation</i>				

Potentiel de consigne [pH]	5,0	5,0	5,0	5,0
Plage de régulation [pH]	0,2	0,2	0,2	0,2
Tendance	Négative	Négative	Négative	Négative
Taux de dosage (max) [mL min ⁻¹]	0,05	0,05	0,05	0,05
Taux de dosage (min) [µL min ⁻¹]	10	10	10	10
<i>Surveillance</i>				
Surveillance	Non	Non	Non	Non
<i>Arrêt</i>				
A Vmax [10]	10,0	10,0	10,0	10,0
À partir de t(min)	Non	Non	Non	Non
Pour t(max)	Oui	Oui	Oui	Oui
t(max) [min]	10	10	10	10
Après la durée de régulation	Non	Non	Non	Non
Au taux minimal	Non	Non	Non	Non
<i>Enregistrement de la valeur mesurée</i>				
Intervalle [s]	1	1	1	1
Condition de départ	Aucun	Aucun	Aucun	Aucun
<i>Condition</i>				
Condition	Non	Non	Non	Non
8- Titration (EP) [4] (de 20-30 min pH 5,0-2,5)				
<i>Réactif</i>				
Réactif	HCl	HCl	HCl	HCl
Concentration [mol L ⁻¹]	10	10	10	10
Addition continue	Non	Non	Non	Non
<i>Capteur</i>				
Type	pH	pH	pH	pH
Capteur	SURFACE	SURFACE	SURFACE	SURFACE
Unité	pH	pH	pH	pH
<i>Saisie de la température</i>				
Saisie de la température	Non	Non	Non	Non
<i>Agiter</i>				
Vitesse [%]	0	0	0	0
<i>Prétitrage</i>				
Prétitrage	Non	Non	Non	Non
<i>Prédosage</i>				
Mode	Aucun	Aucun	Aucun	Aucun
Temps d'attentes [s]	0	0	0	0
<i>Régulation</i>				
Potentiel de consigne [pH]	2,5	2,5	2,5	2,5
Plage de régulation [pH]	0,2	0,2	0,2	0,2
Tendance	Négative	Négative	Négative	Négative
Taux de dosage (max) [mL min ⁻¹]	0,15	0,15	0,15	0,10
Taux de dosage (min) [µL min ⁻¹]	10	10	10	10
<i>Surveillance</i>				
Surveillance	Non	Non	Non	Non
<i>Arrêt</i>				
A Vmax [10]	10,0	10,0	10,0	10,0
À partir de t(min)	Non	Non	Non	Non
Pour t(max)	Oui	Oui	Oui	Oui
t(max) [min]	10	10	10	10
Après la durée de régulation	Non	Non	Non	Non
Au taux minimal	Non	Non	Non	Non
<i>Enregistrement de la valeur mesurée</i>				
Intervalle [s]	1	1	1	1
Condition de départ	Aucun	Aucun	Aucun	Aucun
<i>Condition</i>				
Condition	Non	Non	Non	Non
(-)/9- Titration (EP) [5] (de 30 - X min pH 2,5)				
<i>Réactif</i>				
Réactif	-	HCl	HCl	HCl
Concentration [mol L ⁻¹]	-	10	10	10
Addition continue	-	Non	Non	Non
<i>Capteur</i>				
Type	-	pH	pH	pH
Capteur	-	SURFACE	SURFACE	SURFACE
Unité	-	pH	pH	pH
<i>Saisie de la température</i>				
Saisie de la température	-	Non	Non	Non

Agiter				
Vitesse [%]	-	0	0	0
Prétitrage				
Prétitrage	-	Non	Non	Non
Prédosage				
Mode	-	Aucun	Aucun	Aucun
Temps d'attentes [s]	-	0	0	0
Régulation				
Potentiel de consigne [pH]	-	2,5	2,5	2,5
Plage de régulation [pH]	-	0,2	0,2	0,2
Tendance	-	Négative	Négative	Négative
Taux de dosage (max) [mL min ⁻¹]	-	0,15	0,15	0,15
Taux de dosage (min) [µL min ⁻¹]	-	10	10	10
Surveillance				
Surveillance	-	Non	Non	Non
Arrêt				
A Vmax [10]	-	10,0	10,0	10,0
À partir de t(min)	-	Non	Non	Non
Pour t(max)	-	Oui	Oui	Oui
t(max) [min]	-	30	90	90
Après la durée de régulation	-	Non	Non	Non
Au taux minimal	-	Non	Non	Non
Enregistrement de la valeur mesurée				
Intervalle [s]	-	1	1	1
Condition de départ	-	Aucun	Aucun	Aucun
Condition				
Condition	-	Non	Non	Non
(9/10)- Calcul R1				
Résultats	Consommation	Consommation	Consommation	Consommation
Unité du résultat	mL	mL	mL	mL
Formule	R = VEQ	R = VEQ	R = VEQ	R = VEQ
Constante C =	1	1	1	1
M	M[Hydrochloric acid]	M[Hydrochloric acid]	M[Hydrochloric acid]	M[Hydrochloric acid]
z	z[Hydrochloric acid]	z[Hydrochloric acid]	z[Hydrochloric acid]	z[Hydrochloric acid]
Nombre de décimales	3	3	3	3
Limites de résultats	Non	Non	Non	Non
Statistiques d'enregistrement	Oui	Oui	Oui	Oui
Fonctions supplémentaires de statistiques	Non	Non	Non	Non
Envoyer à la mémoire cache	Non	Non	Non	Non
Condition	Non	Non	Non	Non
(10/11)- Compte rendu				
Résumé	Par échantillon	Par échantillon	Par échantillon	Par échantillon
Résultats	Par série	Par série	Par série	Par série
Résultats bruts	Par échantillon	Par échantillon	Par échantillon	Par échantillon
Tabl. val. mesurées	Toutes les fonct. de titr.	Toutes les fonct. de titr.	Toutes les fonct. de titr.	Toutes les fonct. de titr.
Données de l'échantillon	Non	Non	Non	Non
Données des ressources	Non	Non	Non	Non
E - V	Toutes les fonct. de titr.	Toutes les fonct. de titr.	Toutes les fonct. de titr.	Toutes les fonct. de titr.
dE/dV - V	Non	Non	Non	Non
Log dE/dV - V	Non	Non	Non	Non
D ² E/dV ² - V	Non	Non	Non	Non
BETA - V	Non	Non	Non	Non
E - t	Non	Non	Non	Non
V - t	Non	Non	Non	Non
dV/dt - t	Non	Non	Non	Non
T - t	Non	Non	Non	Non
E - V & dE/dV - V	Non	Non	Non	Non
V - t & dV/dt - t	Non	Non	Non	Non
Méthode	Non	Non	Non	Non
Données de série	Non	Non	Non	Non
Condition	Non	Non	Non	Non
(11/12)- Fin de l'échantillon				

Tableau 3-5. Programmation du titrateur « Mettler Toledo T90 Titration Excellence 4.00 » (Schwerzenbach, Suisse) pour contrôler le pH durant l'étape duodénale (120-180 minutes) de la digestion *in vitro* des fromages Brie expérimentaux.

Programmation au titrateur	Étape de digestion duodénale 120-180 min
1- Désignation	
Type	Titration générale
Compatible avec	T50 / T70 / T90
ID de méthode	rheoCHVD120a180
Désignation	Stating
Auteur	LabX-Light
Date/heure	2014-07-15 14:14:05
Modifié le	2014-07-15 14:14:05
Modifié par	LabX-Light
Protéger	Non
SOP	Aucun
2- Échantillon	
Nombre d'ID	1
ID 1	--
Mode d'entrée	Volume fixe
Volume [mL]	72
Masse volumique [g mL ⁻¹]	1
Facteur de correction	1.0
Température [°C]	37
3- Poste de titrage (Poste manuel)	
Type	Poste manuel
Poste de titrage	Manual stand 1
4- Agiter	
Vitesse [%]	0
Durée [secondes]	0
Condition	Non
5- Titration (EP) [1] (de 120-180 min pH 6,75)	
<i>Réactif</i>	
Réactif	NaOH
Concentration [mol/L]	5
Addition continue	Non
<i>Capteur</i>	
Type	pH
Capteur	SURFACE
Unité	pH
<i>Saisie de la température</i>	
Saisie de la température	Non
<i>Agiter</i>	
Vitesse [%]	0
<i>Pré-titration</i>	
Pré-titration	Non
<i>Pré-dosage</i>	
Mode	Aucun
Temps d'attente [s]	0
<i>Régulation</i>	
Potentiel de consigne [pH]	6,75
Plage de régulation [pH]	0,25
Tendance	Positive
Taux de dosage (max) [mL min ⁻¹]	0,50
Taux de dosage (min) [µL min ⁻¹]	10
<i>Surveillance</i>	
Surveillance	Non
<i>Arrêt</i>	
A Vmax [10]	10,0
À partir de t(min)	Non
Pour t(max)	Oui
t(max) [min]	60
Après la durée de régulation	Non
Au taux minimal	Non
<i>Enregistrement de la valeur mesurée</i>	
Intervalle [s]	1
Condition de départ	Aucun
<i>Condition</i>	

Condition	Non
6- Calcul R1	
Résultats	Consommation
Unité du résultat	mL
Formule	R = VEQ
Constante C =	1
M	M[Hydrochloric acid]
z	z[Hydrochloric acid]
Nombre de décimales	3
Limites de résultats	Non
Statistiques d'enregistrement	Oui
Fonctions supplémentaires de statistiques	Non
Envoyer à la mémoire cache	Non
Condition	Non
7- Compte rendu	
Résumé	Par échantillon
Résultats	Par série
Résultats bruts	Par échantillon
Tabl. val. mesurées	Toutes les fonct. de titr.
Données de l'échantillon	Non
Données des ressources	Non
E - V	Toutes les fonct. de titr.
dE/dV - V	Non
Log dE/dV - V	Non
D²E/dV² - V	Non
BETA - V	Non
E - t	Non
V - t	Non
dV/dt - t	Non
T - t	Non
E - V & dE/dV - V	Non
V - t & dV/dt - t	Non
Méthode	Non
Données de série	Non
Condition	Non
8- Fin de l'échantillon	

Tableau 3-6. Programmation du titrateur « Mettler Toledo T90 Titration Excellence 4.00 » (Schwerzenbach, Suisse) pour ajuster le pH à $7,00 \pm 0,05$ à la fin de digestion *in vitro* des fromages Brie expérimentaux.

Programmation au titrateur	Ajustement des échantillons à pH 7,0
1- Désignation	
Type	Titrage général
Compatible avec	T50 / T70 / T90
ID de méthode	rheoCHVajustpH7
Désignation	EP
Auteur	LabX-Light
Date/heure	2014-07-15 13:45:52
Modifié le	2014-07-28 09:18:59
Modifié par	LabX-Light
Protéger	Non
SOP	Aucun
2- Echantillon	
Nombre d'ID	1
ID 1	--
Mode d'entrée	Volume fixe
Volume [mL]	72
Masse volumique [g mL ⁻¹]	1
Facteur de correction	1.0
Température [°C]	37
3- Poste de titrage (Poste manuel)	
Type	Poste manuel
Poste de titrage	Manual stand 1
4- Agiter	
Vitesse [%]	0

Durée [secondes]	0
Condition	Non
5- Titrage (EP) [1]	
<i>Réactif</i>	
Réactif	NaOH
Concentration [mol L ⁻¹]	5
<i>Capteur</i>	
Type	pH
Capteur	SURFACE
Unité	pH
<i>Saisie de la température</i>	
Saisie de la température	Non
<i>Agiter</i>	
Vitesse [%]	0
<i>Prédosage</i>	
Mode	Aucun
Temps d'attentes [s]	0
<i>Régulation</i>	
Mode	Absolu
Tendance	Aucun
Valeur de point final [pH]	7.0
Plage de régulation	0.05
Taux de dosage (max) [mL min ⁻¹]	1 ou 3
Taux de dosage (min) [µL min ⁻¹]	10
<i>Arrêt</i>	
A EP	Oui
Temporisation de l'arrêt [s]	30
A Vmax [10]	10
Temps max. [s]	300
<i>Régulation d'accompagnement</i>	
Régulation d'accompagnement	Non
<i>Condition</i>	
Condition	Non
(6)- Calcul R1	
Résultats	Consommation
Unité du résultat	mL
Formule	R = VEQ
Constante C =	1
M	M[Hydrochloric acid]
z	z[Hydrochloric acid]
Nombre de décimales	3
Limites de résultats	Non
Statistiques d'enregistrement	Oui
Fonctions supplémentaires de statistiques	Non
Envoyer à la mémoire cache	Non
Condition	Non
(7)- Compte rendu	
Résumé	Par échantillon
Résultats	Par série
Résultats bruts	Par échantillon
Tabl. val. mesurées	Toutes les fonct. de titr.
Données de l'échantillon	Non
Données des ressources	Non
E - V	Toutes les fonct. de titr.
dE/dV - V	Non
Log dE/dV - V	Non
D ² E/dV ² - V	Non
BETA - V	Non
E - t	Non
V - t	Non
dV/dt - t	Non
T - t	Non
E - V & dE/dV - V	Non
V - t & dV/dt - t	Non
Méthode	Non
Données de série	Non
Condition	Non
(8)- Fin de l'échantillon	