

# Comprendre le Rôle des Protéines Laitières dans la Performance des Ingrédients et des Produits



Préparé par:  
Hasmukh Patel  
et Sonia Patel  
*Université d'Etat du Dakota du Sud*

Édité par :  
Robert Beausire  
*KaiNutra LLC.*

Révisé par :  
Shantanu Agrawal  
*National Dairy Council*

## Introduction

Les protéines sont un composant alimentaire essentiel dont un apport suffisant est essentiel pour une alimentation saine et équilibrée. Actuellement, les consommateurs sont de plus en plus conscients et informés sur les avantages des protéines dans l'alimentation et reconnaissent leur rôle important dans la gestion de la faim, le maintien de l'énergie et l'optimisation de la performance. Les produits laitiers sont une source importante de protéines polyvalentes, multifonctionnelles et de haute qualité. De nombreux producteurs d'aliments et de boissons tentent d'incorporer les protéines lactiques dans leurs produits. En plus du fait qu'elles constituent une excellente source de nutrition, les protéines du lait assurent les «clean labels» désirés par les consommateurs ainsi que plusieurs avantages fonctionnels dans les produits finis: solubilité, stabilité thermique, gélification, moussage et émulsification.

Le lait est un système nutritionnel dynamique complexe ayant plusieurs avantages nutritionnels et fonctionnels. Le degré de transformation affecte ses propriétés et son comportement dans la nourriture. Les protéines du lait sont particulièrement complexes et sensibles à plusieurs conditions de transformation utilisées dans les industries laitière et alimentaire (ex. cisaillement, traitement thermique). La transformation modifie la structure des protéines du lait, menant à leur dénaturation, agrégation et interaction. Le type et le degré des interactions protéiques varient selon plusieurs facteurs tels que les conditions de transformation (ex. combinaison durée-température), la force ionique, la concentration en protéines, le pH et la composition du produit. Ces changements protéiques peuvent aussi affecter les propriétés fonctionnelles des ingrédients laitiers, telles que la solubilité, la gélification, la stabilité thermique et l'émulsification, qui affectent finalement leurs performances dans les produits finis. Par ailleurs, les changements induits par la chaleur dans la fonctionnalité de la protéine du lait aident à améliorer les propriétés sensorielles des produits laitiers et alimentaires, tels que les yaourts, les produits de boulangerie et les confiseries. C'est pourquoi, comprendre les protéines lactiques et leur fonctionnalité peut aider à adapter les propriétés fonctionnelles des ingrédients laitiers et des produits laitiers et alimentaires finis.

Ce rapport technique permet aux formulateurs d'aliments et de boissons de saisir la complexité des protéines du lait et les différents types et caractéristiques de protéines. Il offre aussi des recherches sur plusieurs protéines lactiques, étudie comment les conditions de production affectent la performance des protéines lactiques, et propose des moyens pour améliorer la qualité et utiliser les protéines lactiques pour créer de nouveaux aliments et boissons. Voir la page 16 pour le sommaire des différentes sections du rapport.

## La structure des protéines

Les acides aminés sont les éléments de base des protéines. Leur séquence dans une protéine en détermine sa structure, conformation et propriétés. Selon le type d'acides aminés présents, différentes conformations sont possibles. Elles sont stabilisées par des forces moléculaires diverses qui déterminent la conformation des protéines. Ce sont des interactions électrostatiques, des liaisons hydrogènes, des liaisons disulfures, des interactions dipôle-dipôle, des interactions hydrophobes et des forces de Van der Waals (figure 1).<sup>1,2,3</sup>

Les structures natives des protéines sont organisées à 4 niveaux différents: les structures primaire, secondaire, tertiaire et quaternaire (figure 2). La structure primaire est la séquence spécifique d'acides aminés au long de la chaîne polypeptidique liée de façon covalente (figure 2a). Au vu des forces moléculaires créées entre les chaînes latérales d'acides aminés, la structure primaire se replie de façon ordonnée, formant les structures secondaire et tertiaire qui donnent lieu à une structure native repliée de manière unique et possédant la plus faible énergie libre possible. Les hélices alpha et les feuillets plissés bêta sont les structures secondaires régulières les plus abondantes dans les protéines. L'hélice alpha apparaît à travers un enroulement hélicoïdal de la chaîne d'acides aminés et est stabilisée par des liaisons hydrogènes entre les atomes des liaisons peptidiques. Les feuillets plissés bêta sont formés par l'alignement linéaire de certaines matrices de la chaîne d'acides aminés (figure 2b). Cette structure est aussi stabilisée par une liaison hydrogène entre les brins.

La structure tertiaire est la disposition tridimensionnelle des différents éléments présents dans la protéine. Les interactions inter- et intramoléculaires sont équilibrées de façon si fine qu'une structure tridimensionnelle se forme et est maintenue par des liaisons hydrogènes, interactions hydrophobes, forces de Van der Waals et interactions électrostatiques (figure 2c). La structure quaternaire est un superassemblage de molécules de protéines individuelles. Ces structures quaternaires résultent des interactions entre deux ou plusieurs chaînes polypeptidiques (figure 2d) aménagées par la disposition dans l'espace, par des interactions non covalentes, en une protéine multimère.<sup>2,5</sup>

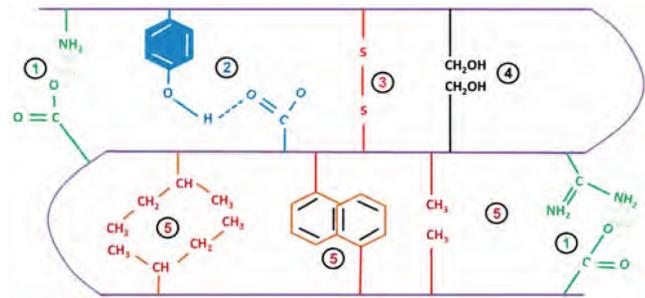


Figure 1: Schéma illustrant les forces stabilisantes présentes dans les protéines: 1. Interactions électrostatiques ; 2. Liaisons hydrogènes ; 3. Liaisons disulfures ; 4. Interactions dipôle-dipôle ; 5. Interactions hydrophobes.<sup>1</sup>

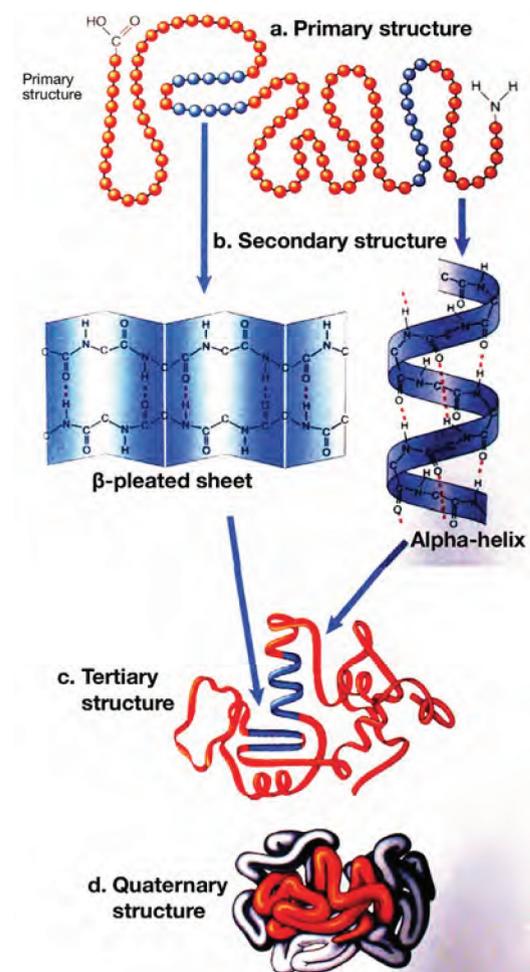
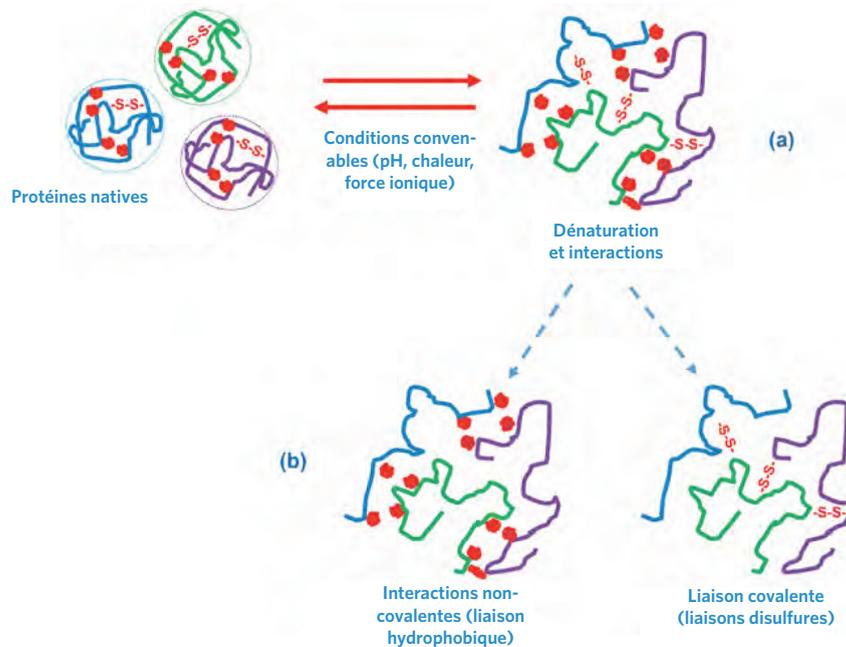


Figure 2: représentation schématique de quatre différents niveaux de structures protéiques, les structures : a. primaire ; b. secondaire ; c. tertiaire et d. quaternaire.<sup>4</sup>

## La dénaturation des protéines

La dénaturation ou dépliement des protéines est la rupture ou modification des forces stabilisantes dans la structure native. La chaleur, la pression, le cisaillement ou les changements de conditions de formulation (ex. pH ou force ionique) peuvent mener les protéines à perdre leur structure native; la molécule de protéine native compacte commence à se déplier en une structure aléatoire et désordonnée (figure 3). L'apparition d'agrégats de protéines liés par des liaisons intermoléculaires et intramoléculaires, comme les liaisons covalentes (liaisons disulfures) ou les liaisons non-covalentes (interactions électrostatiques et interactions de Van der Waals) est possible en fonction des conditions de formulation ou de transformation. Il importe aussi de noter que le terme général «dénaturation» peut comprendre plusieurs formes dénaturées de protéines, variant entre modifications légères dans la structure tertiaire sans changements dans la structure secondaire (forme non-native) et modifications importantes dans la structure secondaire et, par conséquent, dans la structure tertiaire.<sup>1</sup>



**Figure 3:** illustration de changements induits par la chaleur dans la structure native des protéines, tels que: a. la dénaturation des protéines et b. la formation d'interactions protéiques covalentes et non-covalentes.

## Les protéines du lait: Identification, structure et propriétés physicochimiques

Le lait est un liquide biologique complexe contenant de l'eau, des matières grasses, du lactose, des protéines et des minéraux (Tableau 1). L'eau est présente comme phase continue dans laquelle d'autres composantes sont soit dissoutes, soit en suspension. Le lactose et une part des sels minéraux se trouvent dans la solution ; tandis que les protéines et les minéraux restants se trouvent dans une suspension colloïdale.

TABLEAU 1: COMPOSITION MOYENNE DE LAIT DE VACHE CRU<sup>6</sup>

COMPOSANTE	% (M/M) DANS LE LAIT
Eau	87,30
Lactose	4,60
Matière grasse	3,90
Protéines	3,30
Protéines de caséine 2,60	
Protéines de lactosérum 0,70	
Minéraux	0,70
Acides organiques	0,20

Le lait de vache contient de 30 à 35 g/kg de protéines généralement classées en 2 catégories principales, à savoir, la caséine et les protéines de lactosérum.<sup>6,7</sup> La caséine existe principalement à l'état colloïdal, et les protéines de lactosérum sous forme soluble. La caséine et les protéines de lactosérum offrent nombreuses propriétés fonctionnelles et jouent différents rôles suivant leur état et structure dans la solution aqueuse.

Les caséines et les protéines de lactosérum ont des structures très distinctes et ont donc différentes propriétés physicochimiques qui forment la base de la fabrication de plusieurs produits laitiers et alimentaires. La comparaison entre les propriétés des caséines et des protéines de lactosérum est résumée dans le **Tableau 2**. D'après ces propriétés, il est évident que les propriétés des protéines du lait affectent leur comportement dans les produits alimentaires. Un exemple courant serait la précipitation de la caséine. L'abaissement du pH du lait par fermentation ou acidification directe donne des produits comme le yaourt et le cottage. En effet, la coagulation de la caséine kappa ( $\kappa$ -CN) grâce à la présure mène à la production des fromages.

La  $\kappa$ -CN est l'une des quatre principaux types de molécules de caséines, qui comprennent aussi les caséines alpha-s1, alpha-s2 et bêta. Les caséines alpha et bêta sont des protéines hydrophobes et précipitent aisément en présence de calcium. Par contre, la  $\kappa$ -CN est une molécule tout à fait distincte et ne précipite pas en présence de calcium. Quand les caséines sont sécrétées, elles s'associent les unes aux autres et forment des agrégats appelés micelles, dans lesquels les caséines alpha et bêta sont protégées contre la précipitation grâce à leurs interactions avec la  $\kappa$ -CN. En bref, la  $\kappa$ -CN permet normalement à la majorité des protéines du lait de rester solubles et les empêche de coaguler spontanément.

**TABLEAU 2: COMPARAISON ENTRE CERTAINES PROPRIÉTÉS PHYSICOCHIMIQUES DES CASÉINES ET DES PROTÉINES DE LACTOSÉRUM<sup>8</sup>**

PROPRIÉTÉS	CASÉINES	PROTÉINES DE LACTOSÉRUM
Structure	Dépourvues d'une structure secondaire, tertiaire et quaternaire bien définie; ont une structure aléatoire en spirale	Structure tertiaire et quaternaire bien définie
Composition d'acides aminés	Pauvres en acides aminés contenant du soufre; riches en proline	Relativement riches en acides aminés contenant du soufre; pauvres en proline
Etat physique	Existe comme agrégats colloïdaux larges appelés micelles de caséine	Existent comme protéines globulaires en forme de monomères à octamères, en fonction du pH
Solubilité à un pH de 4,6	Insolubles à un pH de 4,6	Solubles à un pH de 4,6
Stabilité thermique	Sont très résistantes à la chaleur (peuvent résister aux traitements thermiques intenses tels que la stérilisation, la ultra-haute température (UHT) ou le traitement en autoclave)	Sensibles à la chaleur (peuvent être complètement dénaturées, notamment au cours d'un chauffage à 90 °C ou plus)
Coagulation par protéolyse limitée ou éthanol	Peuvent être coagulées par protéolyse limitée spécifique (ex. coagulation présure) ou éthanol	Ne peut pas coaguler aisément par enzyme ou protéolyse limitée ou éthanol)

## Les caséines

Les caséines sont les principales protéines du lait, constituant environ 80% de la matière azotée totale dans le lait de vache. Elles existent dans le lait comme micelles de caséine. De nombreux modèles de la structure des micelles de caséine ont été proposés depuis l'établissement des rapports initiaux en 1969.<sup>9</sup> En raison de sa nature amphiphile, la caséine a d'excellentes propriétés tensio-actives et émulsifiantes et une charge relativement élevée, et contient de nombreux résidus de proline mais peu de résidus de cystéine.<sup>10</sup> Un aperçu détaillé de la structure et des propriétés des micelles de caséine a été publié.<sup>11</sup>

Les caséines possèdent de faibles niveaux de structures secondaires et tertiaires. Il s'agit d'une caractéristique qui contribue à leur stabilité remarquable à des températures élevées. Cependant, lorsqu'elles sont soumises à un traitement thermique intense, les caséines subissent des changements, tels que la déphosphorylation et la protéolyse. La polymérisation des caséines peut se produire suite aux réactions de condensation (réaction de Maillard) et à la formation de la lysinoalanine. Les changements qui ont lieu dans les micelles de caséine lors du traitement thermique comprennent une augmentation du diamètre hydrodynamique, une baisse du potentiel zêta et de l'hydratation, et la séparation des caséines des micelles,<sup>12,13</sup> qui ont été examinées en détail.<sup>14,11</sup>

L'association et la dissociation des micelles de caséine se produisent suivant les conditions de traitement, le pH et l'environnement ionique. C'est une propriété importante des micelles de caséine, qui forme la base de divers produits et ingrédients laitiers fonctionnels tels que le yaourt, le fromage et le caséinate de sodium (Figure 4).

Plusieurs propriétés technologiquement importantes du lait -telles que la stabilité thermique, le degré de coagulation présure et les propriétés de résistance et de synérèse des gels présure- sont fortement influencées par les ions calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ). La liaison des ions  $\text{Ca}^{2+}$  avec les caséines a lieu principalement par le biais de résidus phosphoséryles et par l'intermédiaire des chaînes latérales d'acide carboxylique.

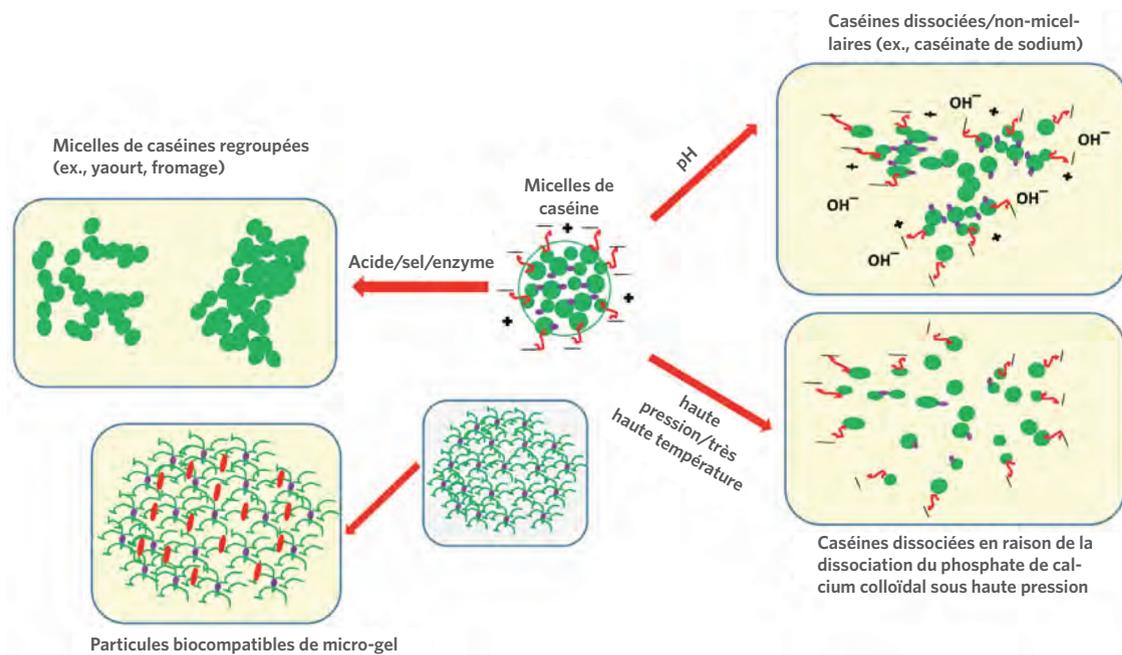


Figure 4: Approches variées pour modifier la fonctionnalité des protéines du lait.<sup>15</sup> Schéma illustrant les changements dans les micelles de caséine telles qu'influencées par le changement des conditions de traitement et de formulation.

### Les protéines de lactosérum

Les protéines de lactosérum ou protéines sériques du lait sont des protéines qui restent solubles suite à la précipitation isoélectrique de la caséine à un pH de 4,6 à 20°C pour produire du lactosérum acide, ou suite à la coagulation de la caséine par protéolyse limitée avec présure pour produire du lactosérum doux.<sup>16,17</sup> Les compositions moyennes de ces deux types de lactosérum sont présentées dans le tableau 3. Les protéines de lactosérum forment environ 20% (soit 5 à 7 g/L) de la matière azotée totale dans le lait de vache. Les protéines de lactosérum principales sont le  $\beta$ -lactoglobuline ( $\beta$ -LG), l' $\alpha$ -lactalbumine ( $\alpha$ -LA), l'albumine de sérum bovin (BSA) et les immunoglobulines (Igs) par ordre décroissant de la concentration en protéines de lactosérum<sup>3</sup> qui sont essentiellement globulaires avec une répartition assez uniforme des acides aminés hydrophobes/hydrophiles le long de leurs chaînes polypeptidiques (par opposition aux caséines).

TABEAU 3: COMPOSITIONS PROTÉIQUES DU LACTOSÉRUM DOUX ET DU LACTOSÉRUM ACIDE<sup>18,19,17</sup>

PROTÉINES	% APPROXIMATIF DES PROTÉINES DE LACTOSÉRUM TOTALES	
	LACTOSÉRUM ACIDE	LACTOSÉRUM DOUX
$\beta$ -lactoglobuline	54	45
$\alpha$ -lactalbumine	23	18
Albumine de sérum bovin	6	5
Immunoglobulines	6	5
Peptides dérivés de la caséine	2	20
Enzymes	2	2
Complexes protéine/phospholipide	5	5

Elles n'ont pas la nature amphiphile des sous-unités monomères des caséines, un trait qui leur confère maintes propriétés fonctionnelles uniques.<sup>18</sup> La teneur en proline considérablement inférieure des molécules de protéines de lactosérum assure une conformation globulaire avec un large contenu hélicoïdal, ce qui explique leur forte susceptibilité à la dénaturation par la chaleur.<sup>20</sup>

Les protéines de lactosérum sont vendues comme ingrédients alimentaires et nutritionnels, tels que poudres de lactosérum, concentrés de protéines de lactosérum (WPC) et isolats de protéines de lactosérum (WPI). Les WPC et WPI sont des ingrédients précieux dans l'industrie alimentaire vu leur valeur nutritionnelle exceptionnelle et leurs propriétés fonctionnelles importantes, dont l'émulsification, la solubilité et la capacité de former des gels induits par chaleur ou pression.<sup>21,22</sup> La composition des WPC commerciaux varie considérablement,<sup>23,24</sup> vu qu'elle est influencée par divers facteurs comme la concentration, variation saisonnière, le type de lactosérum (source de lactosérum) et les méthodes de traitement utilisées pour produire le WPC (Tableau 4).

La dénaturation des protéines de lactosérum a lieu quand les liaisons hydrogènes, hydrophobes ou covalentes sont affectées.<sup>18</sup> Ceci expose souvent les chaînes latérales d'acides aminés hydrophobes, qui sont d'habitude enfouies dans la structure tridimensionnelle native, provoquant ainsi une réactivité accrue de ces groupes. Les interactions hydrophobes et l'échange sulfhydryle-disulfure permettent aux molécules de protéines dépliées de s'associer les unes aux autres pour former des agrégats (Figure 3) qui deviendront insolubles en grandissant. Les traitements thermiques intenses peuvent causer des interactions avec d'autres molécules de protéines, qui se traduisent en association et agrégation intermoléculaires, et finalement, en précipitation ou gélification, selon plusieurs facteurs, dont le pH, la force ionique, la concentration en protéines et les taux de chauffage et de refroidissement.<sup>25,26,18,2,14,3</sup> Les changements induits par la chaleur possibles dans les protéines du lait sont décrits dans le Tableau 4.

TABLEAU 4: DESCRIPTIONS DE CHANGEMENTS INDUITS PAR LA CHALEUR POSSIBLES DANS LES PROTÉINES<sup>27</sup>

La dénaturation des protéines est toute modification dans la conformation secondaire, tertiaire ou quaternaire, sans rupture des liaisons peptidiques impliquées dans la structure primaire. La conformation finale après dénaturation peut correspondre à une structure peptidique dépliée totalement (hélice aléatoire) ou partiellement.

L'agrégation ou polymérisation: Les termes agrégation ou polymérisation, précipitation, coagulation et floculation renvoient à des interactions protéine-protéine non spécifiées qui aboutissent à la formation de grands complexes de poids moléculaires plus élevés.

La gélification est une agrégation ordonnée de protéines (partiellement) dénaturées et/ou natives, formant une structure réticulaire tridimensionnelle où les interactions protéine-protéine et protéine-solvant sont équilibrées pour former une matrice bien ordonnée capable de retenir de grandes quantités d'eau.

## La relation structure/fonction des protéines du lait

La relation entre la structure et la fonction des protéines du lait dicte leur rôle dans les produits finaux. Le lait est un système colloïdal, et des facteurs extrinsèques et intrinsèques influencent les interactions intra- et inter-protéiques. Parmi les facteurs extrinsèques qui affectent les niveaux de dénaturation, agrégation et interaction protéine-protéine au niveau moléculaire, on cite le pH, la température, concentration en protéines, force ionique et type d'ions, conditions de traitement, et énergie externe, ex.: cisaillement, chaleur, pression élevée ou sonication aux ultrasons. Les facteurs intrinsèques quant-à eux comprennent l'hydrophobicité, les interactions électrostatiques, les liaisons disulfures, la masse moléculaire et la composition d'acides aminés (Figure 5).<sup>28</sup>

FACTEURS EXTRINSÈQUES	FACTEURS INTRINSÈQUES
Température	Composition d'acides aminés
Pression	Masse moléculaire
pH	Hydrophobicité
Concentration en protéines	Interaction électrostatique
Force ionique	Nombre de liaisons disulfure et de groupes sulfuraux libres
Type des sels (monovalents, divalents)	

Figure 5: Facteurs influençant les interactions protéine-protéine.<sup>28</sup>

La structure d'un aliment détermine la texture, les attributs sensoriels, l'aspect, la biodisponibilité, le corps et l'apport des nutriments dans le produit final. Des formulations et conditions de traitement spécifiques peuvent donc être utilisées pour créer des interactions protéine-protéine spécifiques qui mènent finalement à l'élaboration de produits alimentaires ayant des structures différentes. De nombreux types d'interactions protéiques dépendent de l'environnement dans le système d'alimentation, et sont résumés dans la Figure 6. La connaissance de la structure de la protéine et des interactions protéine-protéine est donc utilisée dans le développement d'ingrédients laitiers ayant des fonctionnalités spécifiques, ainsi que dans le développement de produits alimentaires et de boissons finaux.

Il s'agit de combiner la connaissance des relations structure-fonction, interactions protéine-protéine et propriétés fonctionnelles pour modifier les résultats des traitements, tels que les voies de dénaturation et d'agrégation des protéines du lait. Les protéines du lait possèdent par exemple d'excellentes propriétés de stabilisation, de rétention d'eau et d'émulsification qui peuvent être optimisées pour développer des produits alimentaires «clean label» (minimiser l'utilisation de stabilisants et d'émulsifiants). Concevoir des structures alimentaires sur mesure nécessite de combiner la connaissance des propriétés physicochimiques des protéines et les interactions entre les paramètres de traitement et formulation.

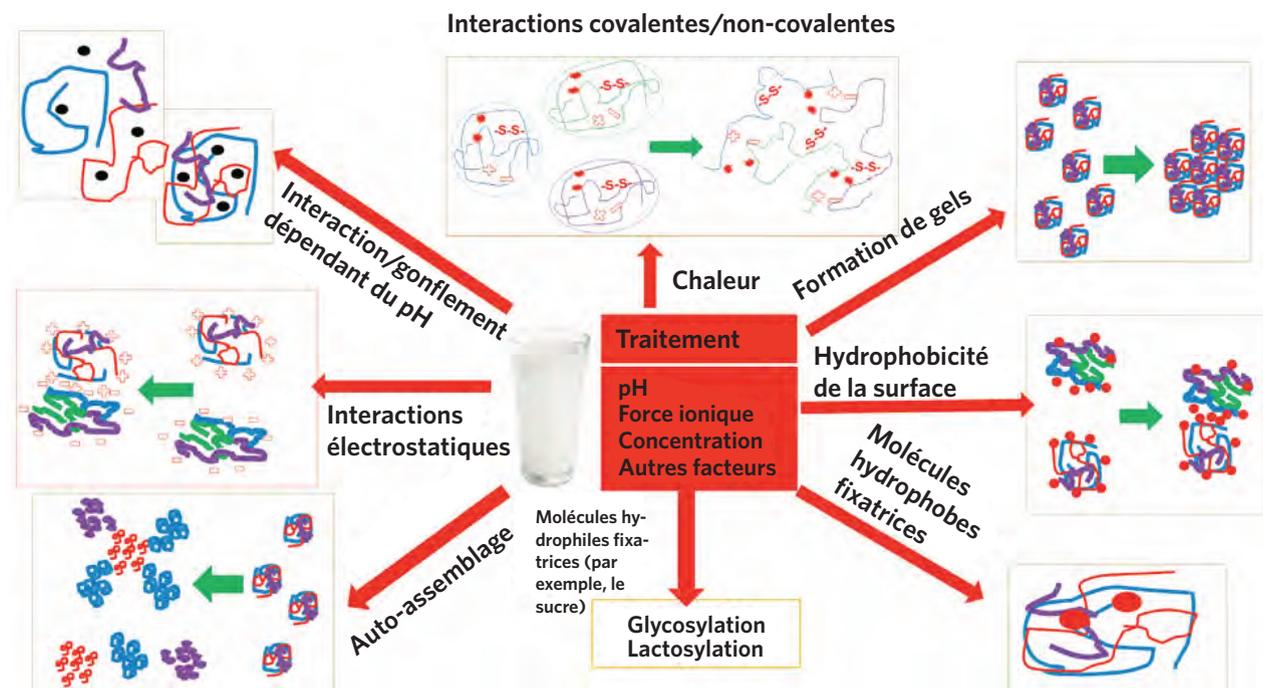


Figure 6: Schéma montrant la possibilité de manipuler les interactions des protéines telles qu'influencées par divers paramètres de traitement et conditions de formulation.<sup>29</sup>

Les changements dans la structure des protéines et l'interaction protéine-protéine ainsi que les interactions des protéines avec d'autres composantes dans le système alimentaire renforcent les propriétés structurales et fonctionnelles (ex.: gélification, viscosité) des produits finaux. Les protéines peuvent interagir avec d'autres protéines ou d'autres composantes dans les systèmes alimentaires, telles que les glucides, les lipides et les minéraux. Ceci rend le système plus complexe mais permet d'élaborer des produits avec une texture nouvelle. Il s'est avéré, par exemple, qu'en présence de petits globules de matières grasses contenant des lipides, avec une distribution de taille de particule étroite, les gels de protéine ont une texture lisse et une rigidité supérieure.<sup>30</sup> Ceci révèle qu'il serait aussi possible de manier la texture et la douceur du produit final en maniant les interactions protéines-lipides dans les systèmes alimentaires.

La charge d'une molécule de protéine à un pH donné est importante car elle affecte la répulsion et interaction électrostatiques des protéines (Figure 7).<sup>31, 32</sup> Les forces de répulsion peuvent être modifiées en changeant le pH de la solution protéique ou par l'addition d'ions ou de sel à la solution protéique, ce qui permet d'obtenir des interactions protéine-protéine faites sur mesure.

C'est l'une des raisons pour réduire les forces de répulsion électrostatiques suite à une élévation de la force ionique.<sup>33</sup> Le type de sel (sels monovalents par opposition aux sels divalents) affecte aussi les interactions protéine-protéine et le type de gel formé. La concentration en sel nécessaire pour modifier la microstructure du gel relève de la position du sel dans la série de Hofmeister.<sup>34</sup>

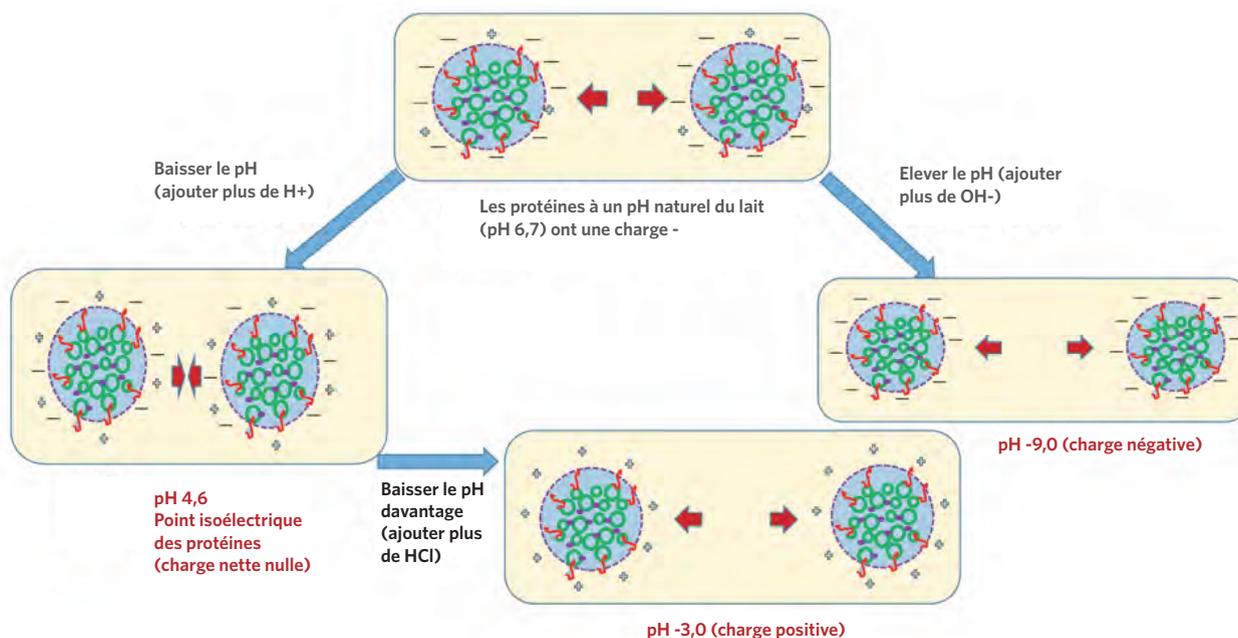


Figure 7: Charge négative nette: schéma montrant l'effet du pH sur les charges des molécules de protéines et les interactions des protéines.<sup>35</sup>

### Fonctionnalité des protéines du lait

Outre le fait qu'elles sont une excellente source de nutrition, les protéines du lait jouent un rôle important dans l'apport de propriétés fonctionnelles désirables dans les produits finaux. Les ingrédients laitiers servent d'ingrédients fonctionnels pour une gamme d'applications dans l'industrie alimentaire (Tableau 5). Des ingrédients tels que le lait entier en poudre (WMP), la poudre de lait écrémé (SMP), les concentrés de protéines du lait (MPC), les WPC et les WPI sont utilisés dans les formulations de produits laitiers recombinaés ou de breuvages nutritionnels ou substituts de repas.

Ces aliments et breuvages sont généralement soumis à d'intenses traitements thermiques, tels que la stérilisation en autoclave ou l'ultra-haute température (UHT), pour prolonger la durée de vie et garantir la sécurité alimentaire pour la consommation humaine. Les ingrédients laitiers utilisés dans les applications d'aliments et boissons qui exigent que le système de protéine maintienne sa solubilité, comme dans les boissons prêtes-à-boire, doivent donc être résistants à la chaleur et supporter des traitements thermiques intenses couramment utilisés.

La stabilité thermique est la capacité des protéines à survivre à des traitements thermiques intenses sans changements nuisibles, tels que viscosité accrue, séparation de phases, turbidité excessive, précipitation ou gélification, pendant ou peu de temps après le traitement.<sup>41</sup> La stabilité thermique du lait dépend de la stabilité de la protéine.<sup>42</sup> Le traitement thermique entraîne la dénaturation et l'agrégation, résultant potentiellement en l'épaississement ou la gélification du mélange.<sup>43</sup> Quand la stabilité thermique est désirée, la dénaturation et l'agrégation de protéines de lactosérum peuvent être nuisibles. Quelques exemples des conséquences d'une faible stabilité thermique durant la transformation se sont:

- Restriction de la concentration en solides (solides totaux) qui peuvent être traités
- Efficacité réduite du processus
- Capacité réduite à supporter le temps et la température au cours du traitement

La stabilité thermique est donc l'une des considérations de traitement les plus importantes dans la sélection des ingrédients à utiliser dans les aliments et boissons.

Les protéines de lactosérum notamment peuvent subir une dénaturation, agrégation et gélification induites par la chaleur (Figure 8). La capacité de former des gels induits par la chaleur pour obtenir les propriétés sensorielles et texturales souhaités dans les aliments est une propriété fonctionnelle importante des protéines de lactosérum. Ces gels peuvent être classés en «gel souple» ou «gel en particules» (selon les propriétés d'apparence, de microstructure ou de rhéologie). Le type de la structure affecte différentes propriétés texturales des produits finis. Le développement d'agrégats de protéines à liaison non-covalente (principalement hydrophobe) et disulfure est possible au cours de l'agrégation et la gélification des protéines de lactosérum.<sup>44,45,46</sup>

**TABLEAU 5: CERTAINES PROPRIÉTÉS FONCTIONNELLES D'INGRÉDIENTS LAITIERS ET LEURS APPLICATIONS DANS LE PRODUIT FINAL** <sup>36,37,38,39,40</sup>

Numéro	Propriété	Description	Exemples d'applications choisies
1	Rétention d'eau	Agit avec les composantes du produit pour assurer une grande capacité de rétention d'eau	Produits carnés Produits de boulangerie Confiseries Fromage d'imitation Desserts glacés Aliments préparés
2	Viscosité	Les interactions avec d'autres composantes du produit, les traitements thermiques, la structure de la protéine et la concentration tous contribuent	Soupes et sauces Yaourts Boudins Boissons
3	Emulsification	Capacité de maintenir deux liquides non-miscibles (ex.: l'eau et l'huile) dans une émulsion stable	Colorant à café Glaces Sauces pour salade Saucissons (émulsions carnées) Soupes et sauces Mayonnaise Fromage fondu
4	Moussage	Capacité de former des mousses stables à l'interface eau-air, assurant un excellent pouvoir foisonnant (à savoir, la capacité d'incorporer et de retenir l'air dans le produit)	Glaces Desserts glacés Crème fouettée et garnitures Confiseries aérées (ex.: le nougat et la guimauve) Gâteaux et mousses Meringues
5	Gélification	Confère une structure physique aux aliments à travers la réticulation des protéines; améliore la sensation bucco tactile dans certaines applications	Yaourts Pâtisseries Crèmes anglaises Confiseries Produits carnés Aliments préparés
6	Solubilité/stabilité thermique	Capacité de rester dans la solution sous différentes conditions et concentrations de traitements, outre des conditions variables comme les changements de pH, de niveaux de minéraux et de traitements thermiques	Lait recombinaé, UHT ou stérilisé Soupes et sauces Nutrition infantile et clinique Colorant à café Boissons pour sportifs Boissons de jus fortifiées en protéines
7	Opacité/limpidité	Attributs visuels variant entre opacité des boissons et limpidité des boissons sportives très acides	Boissons fortifiées à base de lait Boissons protéiques pour sportifs Chocolat Confiseries/Caramels Sauces Sauce pour salade
8	Développement de la saveur/de la couleur	Associé souvent à la réaction de Maillard, confère des caractéristiques désirables comme les saveurs caramélisées et la couleur dorée uniformes	Confiseries, caramels Calissons et couvertures de confiseries Produits de boulangerie (pâte, gâteaux, muffins, biscuits salés) Sauces et soupes

Traditionnellement, la gélification de la protéine était réalisée par chauffage, mais il est possible aussi d'utiliser d'autres procédés physiques et chimiques.<sup>47</sup> En effet, la pression est un autre procédé physique et la réticulation enzymatique, l'acidification et l'utilisation de sels sont des procédés chimiques qui causent des modifications dans la structure de la protéine et des interactions entre protéines et avec d'autres composantes dans les solutions. Les caractéristiques de chaque gel varient selon des facteurs tels que le degré de dénaturation provoquée par le pH, la température, la concentration en protéine et la force et/ou pression ionique.<sup>48</sup> Les interactions entre protéines et protéine-solvant sont apparemment influencés par des facteurs affectant la gélification de la protéine et le type et propriétés des gels.<sup>49,31</sup>

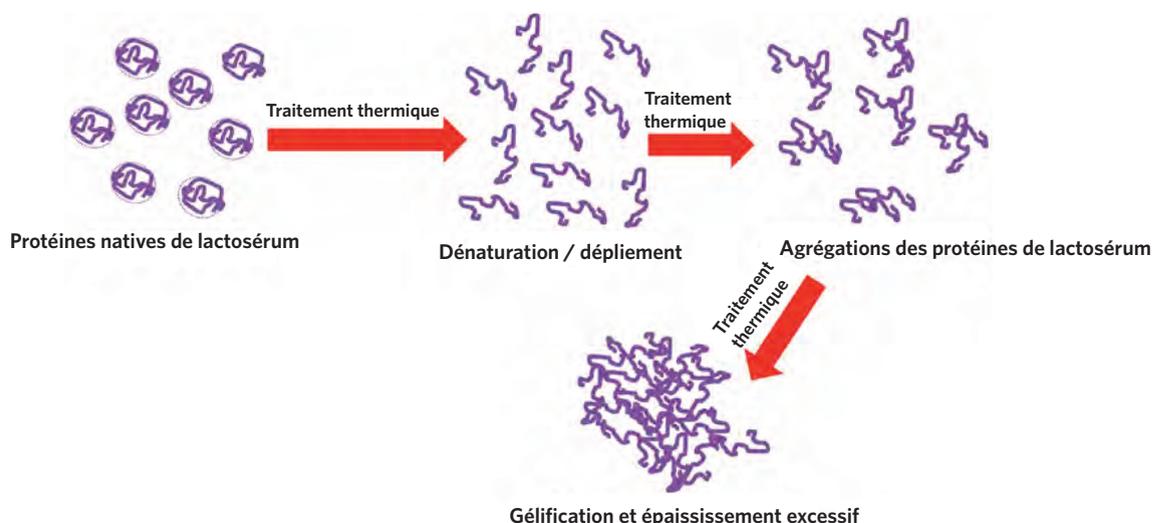


Figure 8: Schéma montrant les effets des traitements thermiques intenses (stérilisation en autoclave ou UHT) des solutions de protéines de lactosérum. Le traitement thermique intense de ces solutions peut mener à la dénaturation, agrégation et gélification ou épaississement excessif des protéines de lactosérum.

### Le traitement thermique et les protéines du lait: effets sur la fonctionnalité

Le traitement thermique est un processus unitaire essentiel utilisé dans l'industrie laitière pour créer des produits microbiologiquement sains, modifier les propriétés fonctionnelles des produits laitiers et prolonger la durée de vie.<sup>17,14,44,50,51</sup> Le Tableau 6 énumère les exemples des traitements thermiques les plus courants utilisés dans la transformation laitière.<sup>17,14</sup>

TABLEAU 6: TRAITEMENTS THERMIQUES COURANTS UTILISÉS DANS LA TRANSFORMATION COMMERCIALE DU LAIT ET DES PRODUITS LAITIERS

Traitement thermique	Conditions de température/durée
Thermisation	65°C/30 secondes
Pasteurisation	72°C/15 secondes
Traitement par préchauffage du lait en poudre	80 à 120°C/2 à 10 minutes
Traitement par préchauffage pour la fabrication de yaourt	90°C/5 à 10 minutes
Stérilisation UHT	140°C/3 à 20 secondes
Stérilisation / traitement en autoclave (lot/récipient)	110 à 120°C/5 à 20 minutes

Ces traitements thermiques mènent à différents degrés d'interactions des protéines, d'agrégation et de dénaturation.<sup>50,52,53</sup> Les immunoglobulines, la lactoferrine et le BSA sont sensibles au traitement thermique. Leur dénaturation partielle a lieu durant la pasteurisation commerciale. Les  $\beta$ -LG et  $\alpha$ -LA sont largement dénaturées durant le traitement UHT et les opérations de préchauffage utilisées pour la fabrication du lait en poudre. Elles forment des proportions variables d'agrégats de poids moléculaire élevé liés par des liaisons disulfures, ou d'agrégats liés de manière hydrophobe, suivant la sévérité du traitement thermique. Ainsi, outre la formation d'agrégats solubles comme les dimères et trimères de  $\beta$ -LG,  $\alpha$ -LA et de BSA, des complexes liés par le disulfure se forment entre les caséines ( $\kappa$ -CN et  $\alpha_2$ -CN) et les protéines de lactosérum.<sup>50,54,52</sup> Ces interactions induites par les processus peuvent aussi être liées à des propriétés fonctionnelles spécifiques.

Lors du chauffage du lait, les protéines de lactosérum interagissent avec les micelles de caséine présentes dans le lait pour former des complexes de protéines de lactosérum-caséines (Figure 9).<sup>55,56,52,53</sup> La plupart des études disent que les réactions d'échange thiol/disulfure engendrant des liaisons disulfures intermoléculaires, jouent un grand rôle dans l'agrégation induite par la chaleur de la  $\beta$ -LG et dans son interaction avec d'autres protéines, y compris les caséines. Des études révèlent aussi que, tout comme l'agrégation par liaisons covalentes intermoléculaires (disulfures), les interactions non-covalentes (ex.: interactions hydrophobes ou ioniques) sont aussi impliquées dans les interactions induites par la chaleur des protéines du lait. Les interactions entre  $\beta$ -LG et  $\kappa$ -CN ont été considérées très importantes pour la fonctionnalité de nombreux produits laitiers. Deux ponts disulfure et un groupe sulfhydryle libre présents dans la structure native de la  $\beta$ -LG jouent un rôle majeur dans ses interactions induites par la chaleur avec les  $\kappa$ -CN (Figure 9).<sup>57,14,58,59,52</sup>

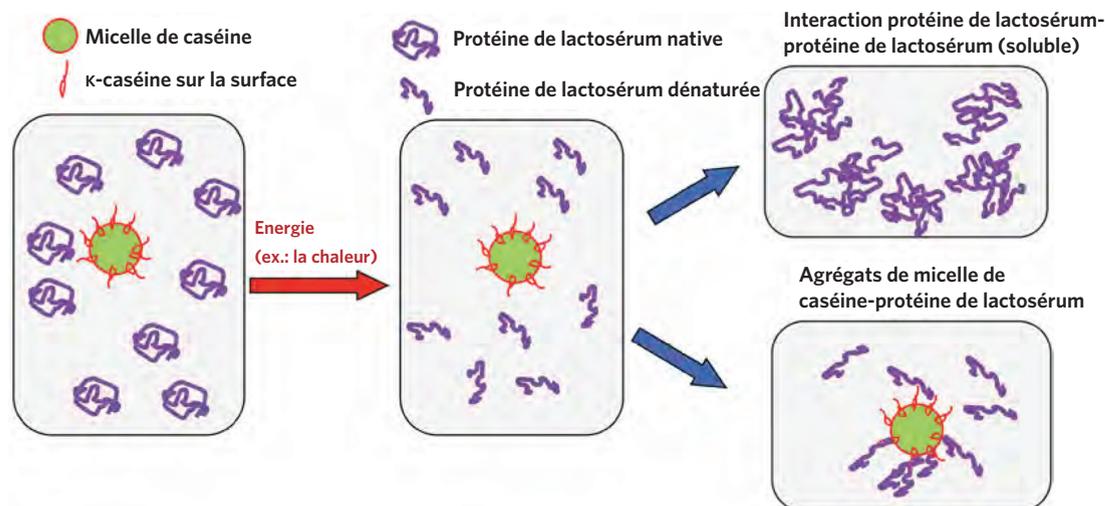


Figure 9: schéma montrant les interactions de protéines possibles dans le lait soumis à un traitement thermique.

La gélification induite par la chaleur des protéines de lactosérum,<sup>3</sup> les traitements de préchauffage pour améliorer la stabilité thermique des produits du lait en poudre, et du lait évaporé et stérilisé,<sup>60,61</sup> les propriétés fonctionnelles améliorées du lait en poudre,<sup>62</sup> et la texture améliorée du yaourt sont des exemples bien connus des effets bénéfiques de la fonctionnalité induite par la chaleur des protéines du lait;<sup>63</sup> un sujet examiné en détail.<sup>52</sup>

### Le traitement thermique et les protéines de lactosérum: effets sur la fonctionnalité

Lors du chauffage, les protéines de lactosérum peuvent se déplier et former des agrégats solubles ou insolubles (gels) en interagissant avec d'autres protéines de lactosérum (voir le Tableau 5 pour la description de la terminologie) dans le système.<sup>64, 65,66,67,68,69,70,46,71,72,73</sup> Les différentes protéines de lactosérum réagissent différemment au traitement thermique: motifs de liaison modifiés, formation d'agrégats inter-protéiques par un échange de liaisons disulfure et d'associations hydrophobes modifiés, et changements de conformation. De nettes différences existent dans les conduites de dénaturation des protéines de lactosérum individuelles parce que les différentes protéines de lactosérum ont des températures de transition thermique différentes (Tableau 7). La dénaturation thermique et l'agrégation des protéines de lactosérum totales reflètent la réponse collective des protéines constituantes, vu l'hétérogénéité du système de protéine de lactosérum, et vu que les protéines individuelles présentent des réactions différentes à la chaleur.<sup>74</sup>

TABLEAU 7: LES TEMPÉRATURES DE DÉNATURATION THERMIQUE ET ENTHALPIES DES PROTÉINES DE LACTOSÉRUM<sup>25,75,17</sup>

Protéines de lactosérum	TD (°C)	TTR (°C)	$\Delta H$ (kJ/mol)
$\beta$ -LG	78	83	311
$\alpha$ -LA	62	68	253
BSA	64	70	803
Ig	72	89	500

TD = température initiale de dénaturation; TTR = température de pic maximum telle que mesurée par analyse calorimétrique différentielle;  $\Delta H$  = enthalpie de dénaturation.

## Quelques applications commerciales de traitements thermiques pour la fonctionnalité des protéines

### 1. Le yaourt

Les traitements de préchauffage (ex.: 90 °C pour 10 minutes) sont utilisés pour le lait avec lequel le yaourt est fabriqué, et il paraît qu'ils améliorent les propriétés texturales, microstructurales et rhéologiques du yaourt.<sup>76,77</sup> Il y a lieu de croire que les interactions induites par la chaleur entre  $\beta$ -LG et  $\kappa$ -CN, via l'échange sulfhydryle-disulfide, sont fondamentales pour l'amélioration dans la structure du yaourt.<sup>14,52</sup> De même, les yaourts préparés avec des laits préchauffés ont des pHs plus élevés lors de la gélification et produisent des gels nettement plus fermes que ceux des yaourts produits à partir de laits non-chauffés.<sup>76,63,56,78</sup>

### 2. Les poudres de lait

Lors de la production des poudres de lait, le lait subit une gamme de traitements de préchauffage afin de créer des poudres de lait ayant des propriétés fonctionnelles spécifiques. Les poudres de lait écrémé sont généralement classées comme poudres chauffées à faible, moyenne et haute températures; une classification souvent basée sur l'indice d'azote des protéines de lactosérum (WPNI - ou la quantité de protéines de lactosérum non-dénaturées présente dans la poudre). Elle est liée à la dénaturation des protéines de lactosérum après un traitement thermique spécifique durant la fabrication de poudres de lait, surtout pendant le traitement de préchauffage, l'évaporation et le séchage.<sup>51</sup> Les interactions entre les protéines de lactosérum dénaturées et les micelles de caséine influencent à la fin la fonctionnalité des poudres de lait et affectent aussi la conduite des micelles de caséine lors de traitements supplémentaires, comme l'évaporation et le séchage.<sup>79</sup> Durant l'évaporation, la taille de la micelle de caséine augmente surtout à cause de l'agrégation des micelles ou de l'association des protéines de lactosérum avec les micelles.

Dans la fabrication de poudres riches en protéines, la concentration de lait par ultrafiltration, surtout la diafiltration avant le séchage, peut provoquer la dissolution du phosphate de calcium colloïdal, ce qui entraîne le relâchement de la structure de la micelle de caséine et le gonflement potentiel des micelles de caséines. En effet, accroître le degré de concentration provoque la dissolution progressive de la structure micellaire d'une micelle intacte en une micelle gonflée diffuse et enfin en une structure micellaire plus petite fragmentée. De tels changements dans la micelle de caséine préparent le lait à d'autres interactions protéine -protéine lors du séchage par pulvérisation et donc influencent la fonctionnalité des ingrédients.<sup>79,80,81</sup>

## Modifications non-thermiques des propriétés des protéines du lait

La stabilité et les propriétés fonctionnelles des protéines du lait, comme la viscosité, la gélification et l'émulsification, peuvent être changées par des modifications physicochimiques des protéines du lait (utilisant chaleur, force ionique, pH, sonication aux ultrasons, cisaillement, traitement à haute pression, et manipulations de charge); par des changements enzymatiques (ex.: réticulation de la transglutaminase (TGase) des protéines); ou par des modifications chimiques (ex.: succinylation, lactosylation et liaison de ligands). Ces approches peuvent être utilisées pour adapter les propriétés fonctionnelles des protéines du lait aux attentes des clients.

Il paraît que la réticulation et la modification enzymatiques des protéines du lait avec la TGase améliorent les propriétés fonctionnelles des protéines du lait,<sup>82</sup> y compris l'augmentation de la résistance du gel, la capacité de rétention d'eau<sup>83</sup> et la viscosité des gels acides.<sup>84,85,86</sup> Ceci permet de produire du yogourt faible en gras sans l'ajout de gommes,<sup>86</sup> et peut aider à éviter la séparation du sérum ou la synérèse causée par des changements de température ou impacts physiques. Traiter la protéine du lait par TGase peut renforcer aussi la stabilité thermique des protéines du lait<sup>87,88,89</sup>. Les modifications enzymatiques peuvent également aider à améliorer l'activité de surface et les propriétés émulsifiantes des protéines du lait.<sup>90</sup>

Les modifications chimiques, telles que la succinylation des protéines du lait,<sup>91</sup> permettent de développer de nouveaux produits à travers la formation de complexes électrostatiquement stables entre les protéines natives anioniques et dérivés protéiques avec une charge nette positive. La disposition des micelles secondaires de caséinate de sodium en microcouches pour stratifier la couche mince par transition progressive peut jouer un rôle important dans la stabilité des émulsions alimentaires.<sup>92,90</sup>

Le traitement des protéines du lait au dioxyde de carbone a été utilisé récemment pour optimiser le rapport caséines micellaires et caséines non-micellaires dans le lait utilisé dans la production de yaourts avec forme, texture et saveur adaptés, et pour renforcer les propriétés fonctionnelles (solubilité, émulsification et stabilité thermique) du MPC et du concentré de caséine micellaire (MCC).<sup>93</sup>

Une autre approche consiste en un traitement à haute pression (HPP) pour préserver et modifier différents aspects des aliments, y compris l'altération de leurs propriétés fonctionnelles.<sup>94,95, 96,97,98</sup> Elle s'est révélée un outil physique pour la modification des protéines et a, par conséquent, le potentiel de produire de nouveaux produits laitiers avec texture et propriétés fonctionnelles modifiées. Le HPP gagne du terrain au niveau de la transformation et préservation alimentaires vu la hausse de la demande des consommateurs pour des produits alimentaires microbiologiquement sains, nutritifs, «clean label» et quasi-frais, avec une durée de vie acceptable.<sup>99,94,95,96</sup> Le HPP mène à la dénaturation, agrégation et gélification des protéines, en changeant l'équilibre délicat entre les liaisons qui stabilisent la structure native des protéines.<sup>100,101,102,103,104</sup> L'impact est distinct de la chaleur et dépend du type de protéine, du pH, de la force ionique,

pression et température de pressurisation exercées, et de la durée du HPP.<sup>105, 102, 106, 107</sup> La déstabilisation peut influencer la conduite d'agrégation, la fonctionnalité induite par la pression (ex.: gélification) et les propriétés physiques, rhéologiques et microstructurales des protéines de lactosérum.<sup>108, 109, 110, 111</sup> Il est possible d'examiner des chapitres exhaustifs sur les effets du HPP sur les protéines du lait.<sup>53, 112, 51, 113</sup>

Le traitement par ultrasons est une technologie naissante dans les applications alimentaires et laitières. L'ultrason relève d'ondes sonores en dessus de la fréquence de l'audition humaine (~>18 kHz), et quand il passe par un liquide, les noyaux de bulles dans le liquide grandissent par diffusion rectifiée et coalescence jusqu'à atteindre une taille critique et s'effondrer sous des conditions quasi-adiabatiques (sans gain ou perte de chaleur), engendrant des conditions extrêmes dans le liquide entourant, telles que turbulences, intenses forces de cisaillement et micro-écoulement. Ceci est une cavitation acoustique<sup>114</sup> et ces effets physiques induits par ultrasons sont de plus en plus utilisés dans la transformation laitière dans des applications telles que le renforcement de l'ultrafiltration du lactosérum,<sup>115</sup> la réduction de la viscosité du produit,<sup>116</sup> l'homogénéisation des globules gras du lait et l'altération des caractéristiques de fermentation,<sup>117</sup> la sonocrystallisation du lactose<sup>118</sup> et le découpage des blocs de fromage.<sup>119</sup>

La disponibilité accrue de flux efficaces continus à grande grâce aux systèmes ultrasoniques a permis à ces processus de passer du stade R&D au stade d'opérations commerciales en Europe et aux États-Unis.<sup>120</sup> Le traitement par ultrasons s'impose comme une technologie de transformation alimentaire importante avec un grand potentiel pour modifier l'application fonctionnelle des protéines laitières (caséine et lactosérum à la fois) et la capacité de réaliser une grande mise à échelle commerciale et un bon retour sur capital investi.<sup>120</sup>

## Conclusion

Le lait et surtout les protéines du lait, sont des systèmes complexes et fascinants conçus par la nature. Ils peuvent être transformés en un grand éventail de produits alimentaires et boissons nutritifs et savoureux. Avec l'évolution de la science et de la technologie alimentaires, nous apprenons constamment comment exploiter le potentiel des protéines du lait pour fournir plus d'avantages nutritifs et fonctionnels pour le développement et la commercialisation des produits alimentaires. Les consommateurs de produits alimentaires deviennent de plus en plus perspicaces, exigeant de nouveaux produits et des saveurs et textures améliorées, avec un étiquetage simple et clair. Le lait et, surtout les ingrédients laitiers, sont bien placés pour offrir aux spécialistes de l'alimentation une opportunité sans cesse croissante pour satisfaire et excéder les attentes des consommateurs.

Pour plus d'informations sur la recherche d'ingrédients laitiers, visitez [ThinkUSADairy.org](http://ThinkUSADairy.org) ou [USDairy.com](http://USDairy.com). Si vous avez besoin d'aide pour fabriquer des produits nouveaux ou améliorés en utilisant des ingrédients laitiers, contactez le Soutien technique laitier sur : [techsupport@ThinkUSADairy.org](mailto:techsupport@ThinkUSADairy.org).

## Références

- 1PRIVALOV PL, GILL SJ. Stability of protein structure and hydrophobic interactions. *Adv Protein Chem.* 1988;39:191-234.
- 2PAULSSON M. Thermal denaturation and gelation of whey proteins and their adsorption at the air/water interface. Lund: Université de Lund, Suède; 1990.
- 3SINGH H, HAVEA P. Thermal Denaturation, Aggregation and Gelation of Whey Proteins. Dans: FOX PF, MCSWEENEY PFH, éditeurs. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins.* 3<sup>ème</sup> édition. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers; 2003:1257-1283.
- 4NISHIURA J. Leçon 2: Structures and Properties of BiologicalMolecules: Proteins. Extraite du cours de biologie 4 de Brooklyn College: [http://academic.brooklyn.cuny.edu/biology/bio4fv/page/3d\\_prot.htm](http://academic.brooklyn.cuny.edu/biology/bio4fv/page/3d_prot.htm).
- 5CONSIDINE T, PATEL HA, ANEMA SG, SINGH H, CREAMER LK. Interactions of milk proteins during heat and high hydrostatic pressure treatments — A Review. *Innov FoodSciEmerg Technol.* 2007;8(1):1-23.
- 6WALSTRA P, JENNESS. R. *Dairy Chemistry and Physics.* John WILEY&Fils, New York; 1984.
- 7FOX PF. Milk Proteins: General and Historical Aspects. Dans:FOX PF, MCSWEENEY PLH, éditeursAdvanced Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins. 3<sup>ème</sup> édition. New York, NY: KluwerAcademic/Plenum Publishers; 2003:1-48.
- 8O'MAHONY JA, FOX PF. Milk Proteins: Introduction and Historical Aspects. Dans:MCSWEENEY PLH, FOX PF, éditeursAdvanced Dairy Chemistry, Volume 1A, Proteins: BasicAspects. 4<sup>ème</sup> édition. New York, NY: Springer Science+Business Media; 2013:43-85.
- 9HUPPERTZ T. Chemistry of caseins. Dans:MCSWEENEY PLH, FOX PF, éditeursAdvanced Dairy Chemistry, Volume 1A: Proteins: Basic Aspects. 4<sup>ème</sup> édition. New York, NY: SpringerScience+Business Media; 2013:135-160.
- 10SWAISGOOD HE. Chemistry of the caseins. Dans:FOX PF, MCSWEENEY PLH, éditeursAdvanced Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins. 3<sup>ème</sup> édition. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers; 2003:139-201.
- 11 de KRUIF CG, HOLT C. Casein Micelle Structure, Functions and Interactions. Dans:FOX PF, MCSWEENEY PLH, éditeurs. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins.* 3<sup>ème</sup> édition. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers; 2003:233-276.
- 12FOX PF. Heat-induced coagulation of milk. Dans:FOX PF, éditeur. *Developments in Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins.* Londres, Angleterre: Applied Science Publishers; 1982:189-228.
- 13SINGH H, CREAMER LK. Heat stability of milk. Dans:FOX PF, éditeur. *Advanced DairyChemistry—1 Proteins.* 2<sup>ème</sup> édition. Londres, Angleterre: Elsevier Applied Science Publishers; 1992:621-656.
- 14SINGH H. Heat-induced changes in casein, including interactions with whey proteins. Dans:FOX PF, éditeur.Heat-induced Changes in Milk, 2<sup>ème</sup> édition. Bruxelles, Belgique: Fédération laitière internationale; 1995:86-104.
- 15HUPPERTZ T, SMIDDY MA, de KRUIF CG. Biocompatible Micro-Gel Particles from Cross-Linked Casein Micelles. *Biomacromolecules.* 2007;8(4):1300-1305.
- 16DONOVAN M, MULVIHILL DM. Thermal Denaturation and Aggregation of Whey Proteins. *Ir J Food Sci Tech.* 1987;11(1):87-100.
- 17JELEN P, RATTRAY W. Thermal denaturation of whey proteins. Dans:FOX PF, éditeur:Heat-induced changes in milk. 2<sup>ème</sup> édition. Bruxelles, Belgique: Fédération laitière internationale; 1995:66-85.
- 18MULVIHILL DM, DONOVAN M. Whey Proteins and Their Thermal Denaturation - A Review. *Ir J Food Sci Technol.* 1987;11:43-47.
- 19PEARCE RJ. Thermal denaturation of whey protein. *Int Dairy Fed Bull.* 1989;238:17-23.
- 20SAWYER L.  $\beta$ -Lactoglobulin. Dans:FOX PF, MCSWEENEY PLH, éditeurs. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins.* 3<sup>ème</sup> édition. New York, NY: Kluwer Academic/PlenumPublishers; 2003:319-386.
- 21 de WIT JN. Thermal Stability and Functionality of Whey Proteins. *J Dairy Sci.* 1990;73(12):3602-3612.
- 22MULVIHILL DM. Production, functional properties and utilization of milk protein products. Dans:FOX PF, éditeur. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 1, Proteins.* Londres, Angleterre:Elsevier Applied Science; 1992:369-404.
- 23MORR CV, FOEGEDING EA. Composition and functionality of commercial whey and milk protein concentrates and isolates: a status report. *Food Technol.* 1990;44(8):100-112.
- 24HUFFMAN LM. Processing of whey for use as a food ingredient. *Food Technol.* 1996;50(2):49-52.
- 25 de WIT JN. Functional properties of whey proteins in food systems. *Neth Milk Dairy J.* 1984;38:71-89.
- 26 de WIT JN. The use of whey protein products. A review. Ede, Pays-Bas: NIZO; 1989.
- 27MESSENS W, VAN CAMP J, HUYGHEBAERT A. The use of high pressure to modify the functionality of food proteins. *Trends Food Sci Technol.* 1997;8(4):107-112.
- 28PHILLIPS LG, WHITEHEAD DM, KINSELLA J. Protein Gelation. Dans:PHILLIPS LG, TAYLOR SL, éditeurs. *Structure—Function Properties of Food Proteins.* San Diego, Californie: Academic Press, Inc.;1994:179-204.
- 29LIVNEY YD. Milk proteins as vehicles for bioactives. *Curr Op Colloid Interface Sci.* 2010;15(102):73-83.
- 30SIKORSKI ZE. Chemical and functional properties of food components. 2<sup>ème</sup> édition. Lancaster, Pennsylvanie: Technomic Publishing Company, Inc.; 1997:119-160.
- 31KINSELLA JE, RECTOR DJ, PHILLIPS LG. Physicochemical properties of proteins: Texturization via gelation, glass and film formation. Dans:YADA RY, JACKMAN RL, SMITH JL, éditeurs. *Protein Structure-Function Relationship in Foods.* New York, NY: Springer Science+Business Media; 1994:1-21.
- 32ZAYAS JF. Functionality of Proteins in Foods. Berlin: Springer-Verlag; 1997:310-365.
- 33FOEGEDING EA, BOWLAND EL, HARDING CC. Factors that determine the fracture properties and microstructure of globular protein gels. *Food Hydrocolloids.* 1995;9(4):237-249.
- 34BYLUND G. *Dairy processing handbook.* Lund, Suède: Tetra Pak Processing Systems AB; 1995.
- 35MULVIHILL DM, KINSELLA JE. Gelation of  $\beta$ -Lactoglobulin: Effects of Sodium Chloride and Calcium Chloride on the Rheological and Structural Properties of Gels. *J Food Sci.* 1988;53(1):231-236.
- 36HUPPERTZ T, PATEL H. Advances in Milk Protein Ingredients. Dans:GHOSH D, DAS S, DEBASIS B, SMART RB, éditeurs. *Innovation in Healthy and Functional Foods.* Londres, Angleterre:CRC Press; 2012:363-386.
- 37MORR CV. Functional properties of milk proteins and their use as food ingredients. Dans:FOX PF, éditeur. *Development in Dairy Chemistry.* Londres, Angleterre: Applied SciencePublishers; 1982:375-379.
- 38Le site web de DairyGood. [dairygood.org](http://dairygood.org). Visité le 24 juin 2015.
- 39Le site web de la Commission laitière canadienne. <http://www.milkingredients.ca/>. Visité le 24 juin 2015.
- 40PATEL H. Prepared Food Application of Milk Powders and Dairy Ingredients. Dans:LAGRANGE V, éditeur. *Reference Manual for U.S. Milk Powders: 2015 Revised Edition.* Arlington, Virginie: Conseil des exportations des produits laitiers américains; 2015.
- 41BURRINGTON KJ, AGRAWAL S. Technical Report: WheyProteinHeatStability. Arlington, Virginie: Conseil des exportations des produits laitiers américains; 2012.
- 42SINGH H. Heat stability of milk. *Int J Dairy Technol.* 2004;57(2-3):111-119.
- 43SINGH H, FOX PF. Heat stability of milk: pH-dependent dissociation of micellar K casein on heating milk at ultra high temperatures. *J Dairy Res.* 1985;52(4):529-538.
- 44PATEL HA, SINGH H, ANEMA SG, CREAMER LK. Effects of Heat and High Hydrostatic Pressure Treatments on Disulfide Bonding Interchanges among the Proteins in Skim Milk. *J Agric Food Chem.* 2006;54(9):3409-3420.
- 45HAVEA P, SINGH H, CREAMER LK, CAMPANELLA OH. Electrophoretic characterization of the protein products formed during heat treatment of whey protein concentratesolutions. *J Dairy Res.* 1998;65(1):79-91.
- 46HAVEA P, SINGH H, CREAMER LK. Heat-induced aggregation of whey proteins: comparison of cheese WPC with acid WPC and relevance of mineral composition. *J Agric Food Chem.* 2002;50(16):4674-4681.
- 47AGUILERA JM. Gelation of whey proteins. *Food Technol.* 1995;49(10):83-89.
- 48TOTOSAUS A, MONTEJANO JG, SALAZAR JA, GUERRERO I. A review of physical and chemical protein-gel induction. *Int J Food Sci Tech.* 2002;37(6):589-601.
- 49HERMANSSON, AM. Aggregation and denaturation involved in gel formation. Dans:POUR-EL A, ed. *Functionality and Protein Structure.* ACS Symposium Series 92. Washington, DC: Société américaine de chimie; 1979:81-103.
- 50PATEL HA, ANEMA SG, HOLROYD SE, SINGH H, CREAMER LK. Methods to determine denaturation and aggregation of proteins in low-, medium- and high-heat skim milkpowders. *Lait.* 2007;87(4-5):251-268.

- 51PATEL HA, CARROLL T, KELLY AL. Nonthermal Preservation Technologies for Dairy Applications. Dans:CHANDAN RC, KILARA A, SHAH NP, éditeurs Dairy Processing & Quality Assurance. Ames, Iowa: Wiley-Blackwell; 2008:465-482.
- 52ANEMA SG. The whey proteins in milk: thermal denaturation, physical interactions and effects on functional properties of milk. Dans:THOMPSON A, BOLAND M, HARJINDERS, éditeurs. Milk Proteins: From Expression to Food. 1ère édition. Amsterdam, Les Pays-Bas: Elsevier Inc.; 2009:239-281.
- 53PATEL HA, CREAMER LK. High pressure-induced interactions involving whey proteins. Dans:THOMPSON A, BOLAND M, SINGH H, éditeurs. Milk Proteins: From Expression to Food, 1ère édition. Food Science and Technology: International Series. New York, NY: Elsevier Inc.; 2009:205-227.
- 54CONSIDINE T, PATEL HA, SINGH H, CREAMER LK. Influence of binding of conjugated linoleic acid and myristic acid on the heat- and pressure-induced unfolding and aggregation of  $\beta$ -lactoglobulin B. Food Chem. 2007;102(4):1270-1280.
- 55ANEMA SG, LI Y. Further Studies on the Heat-induced, pH-dependent Dissociation of Casein from the Micelles in Reconstituted Skim Milk. LebensmWiss Technol. 2000;33(5):335-343.
- 56ANEMA SG, LI Y. Association of denatured whey proteins with casein micelles in heated reconstituted skim milk and its effect on casein micelle size. J Dairy Res. 2003;70(1):73-83.
- 57JANG HD, SWAISGOOD HE. Characteristics of the interaction of calcium with casein submicelles as determined by analytical affinity chromatography. Arch Biochem Biophys. 1990;283(2):318-325.
- 58CORREDIG M, DALGLEISH DG. The mechanisms of the heat-induced interaction of whey proteins with casein micelles in milk - effect of protein concentration at pH 6.75 and 8.05. Int Dairy J. 1999;9(3):233-236.
- 59CHO Y, SINGH H, CREAMER LK. Heat-induced interactions of  $\beta$ -lactoglobulin A and  $\kappa$  casein B in a model system. J Dairy Res. 2003;70(1):61-71.
- 60 O'CONNELL JE, FOX PF. Heat-Induced Coagulation of Milk. Dans:FOX PF, MCSWEENEY PLH, éditeurs Advanced Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins. 3ème édition. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers; 2003:879-945.
- 61NIEUWENHUIJSE JA, van BOEKEL MAJS. Protein Stability in Sterilised Milk and Milk Products. Dans:FOX PF, MCSWEENEY PLH, éditeurs. Advanced Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins. 3ème édition. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers; 2003:947-974.
- 62KELLY AL, O'CONNELL JE, FOX PF. Manufacture and Properties of Milk Powders. Dans:FOX PF, MCSWEENEY PLH, éditeurs Advanced Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins. 3ème édition. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers; 2003:1027-1061.
- 63LUCHEY JA, SINGH H. Acid Coagulation of Milk. Dans:FOX PF, MCSWEENEY PLH, éditeurs. Advanced Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins. 3ème édition. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers; 2003:1001-1026.
- 64MCSWINEY M, SINGH H, CAMPANELLA OH. Thermal aggregation and gelation of bovine  $\beta$  lactoglobulin. Food Hydrocolloids. 1994;8(5):441-453.
- 65MCSWINEY M, SINGH H, CAMPANELLA OH, Creamer LK. Thermal gelation and denaturation of bovine  $\beta$ -lactoglobulins A and B. J Dairy Res. 1994;61(2):221-232.
- 66 GEZIMATI J, CREAMER LK, SINGH H. Heat-induced Interactions and Gelation of Mixtures of  $\beta$ -Lactoglobulin and  $\alpha$ -Lactalbumin. J Agric Food Chem. 1997;45(4):1130-1136.
- 67PRABAKARAN S, DAMODARAN S. Thermal Unfolding of  $\beta$ -lactoglobulin: Characterization of Initial Unfolding Events Responsible for Heat-Induced Aggregation. J Agric Food Chem. 1997;45(11):4303-4308.
- 68MANDERSON GA, HARDMAN MJ, CREAMER LK. Effect of Heat Treatment on the Conformation and Aggregation of  $\beta$ -lactoglobulin A, B, and C. J Agric Food Chem. 1998;46(12):5052-5061.
- 69MANDERSON GA, CREAMER LK, HARDMAN MJ. Effect of heat treatment on the circular dichroism spectra of bovine  $\beta$ -lactoglobulin A, B, and C. J Agric Food Chem. 1999;47(11):4557-4567.
- 70HAVEA P, SINGH H, CREAMER LK. Characterization of heat-induced aggregates of  $\beta$  lactoglobulin,  $\alpha$ -lactalbumin and bovine serum albumin in a whey protein-concentrate environment. J Dairy Res. 2001;68(3):483-497.
- 71SCHOKKER EP, SINGH H, PINDER DN, NORRIS GE, CREAMER LK. Characterization of intermediates formed during heat-induced aggregation of  $\beta$ -lactoglobulin AB at neutral pH. Int Dairy J. 1999;9(11):791-800.
- 72SCHOKKER EP, SINGH H, CREAMER LK. Heat-induced aggregation of  $\beta$  lactoglobulin A and B with  $\alpha$ -lactalbumin. Int Dairy J. 2000;10(12):843-853.
- 73HONG Y-H, CREAMER LK. Changed protein structures of bovine  $\beta$  lactoglobulin B and  $\alpha$ -lactalbumin as a consequence of heat treatment. Int Dairy J. 2002;12(4):345-359.
- 74 de WIT JN, KLARENBECK G. Effects of Various Heat Treatments on Structure and Solubility of Whey Proteins. J Dairy Sci. 1984;67(11):2701-2710.
- 75KINSELLA JE, WHITEHEAD DM. Proteins in Whey: Chemical, Physical, and Functional Properties. Adv Food Nutr Res. 1989;33(3):343-438.
- 76LUCHEY JA, SINGH H. Formation and physical properties of acid gels: a review. Food Res Int. 1998;30(7):529-542.
- 77TAMIME AY, ROBINSON RK. Yoghurt: Science and Technology. 2ème édition. Boca Raton, Floride: Woodhead Publishing Ltd. et CRC Press LLC; 1999.
- 78ANEMA SG, LI Y. Effect of pH on the Association of Denatured Whey Proteins with Casein Micelles in Heated Reconstituted Skim Milk. J Agric Food Chem. 2003;51(6):1640-1646.
- 79SINGH H. Interactions of milk proteins during the manufacture of milk powders. Lait. 2007;87(4-5):413-423.
- 80PATEL H, HUPPERTZ T. Effects of High-pressure Processing on Structure and Interactions of Milk Proteins. Dans: Milk Proteins: From Expression to Food. 2ème édition. Amsterdam, les Pays-Bas: Elsevier Inc.; 2014:243-267.
- 81PATEL H, PATEL S. Technical Report: Milk Protein Concentrates: Manufacturing and Applications. Arlington, Virginie: Conseil des exportations des produits laitiers américains; 2014.
- 82NONAKA M, TANAKA H, OKIYAMA A, et al. Polymerization of Several Proteins by Ca<sup>2+</sup>-Independent Transglutaminase Derived from Microorganisms. Agric Biol Chem. 1989;53(10):2619-2623.
- 83KURAIISHI C, YAMAZAKI K, SUSU Y. Transglutaminase: Its utilization in the food industry. Food Rev Int. 2001;17(2):221-246.
- 84FAERGEMAND M, SORENSEN MV, JORGENSEN U, BUDOLFSEN G, QVIST KB. Transglutaminase: effect on instrumental and sensory texture of set style yoghurt. Milchwissenschaft. 1999;54:563-566.
- 85BONISCH MP, HUSS M, WEIT, K, KULOZIK U. Transglutaminase cross-linking of milk proteins and impact on yoghurt gel properties. Int Dairy J. 2007;17(11):1360-1371.
- 86YÜKSEL Z, ERDEM YK. The influence of transglutaminase treatment on functional properties of set yoghurt. Int J Dairy Technol. 2010;63(1):86-97.
- 87O'SULLIVAN MM, KELLY AL, FOX PF. Effect of Transglutaminase on the Heat Stability of Milk: A Possible Mechanism. J Dairy Sci. 2002;85(1):1-7.
- 88O'SULLIVAN MM, KELLY AL, FOX PF. Influence of transglutaminase treatment on some physico-chemical properties of milk. J Dairy Res. 2002;69(3):433-442.
- 89MOUNSEY JS, O'KENNEDY BT, KELLY PM. Influence of transglutaminase treatment on properties of micellar casein and products made therefrom. Lait. 2005;85:405-418.
- 90KRALOVA I, SJOBLUM J. Surfactants Used in Food Industry: A Review. J Dispers Sci Technol. 2009;30(9):1363-1383.
- 91BEL K, MAY RP, KIRSCHNER K, SZADKOWSKI H, MASCHER E, LUNDAHL P. Protein-decorated micelle structure of sodium-dodecyl-sulfate—protein complexes as determined by neutron scattering. Eur J Biochem. 1990;190(2):311-318.
- 92DICKINSON E, GOLDING M, POVEY M. Creaming and Flocculation of Oil-in-Water Emulsions Containing Sodium Caseinate. J Colloid Interface Sci. 1997;185(2):515-529.
- 93MARELLA C, SALUNKE P, BISWAS AC, KOMMINENI A, METZGER LE. Manufacture of modified milk protein concentrate utilizing injection of carbon dioxide. J Dairy Sci. 2014;98(6):3577-3589.
- 94DATTA N, DEETH HC. High pressure processing of milk and dairy products. Aust J Dairy Technol. 1999;54(1):41-48.
- 95DATTA N, DEETH HC. High pressure processing. Dans:ROGINSKI H, FUQUAY JW, FOX PF, éditeurs. Encyclopedia of Dairy Sciences. Londres, Angleterre: Academic Press; 2003:1327-1333.
- 96HUPPERTZ T, KELLY AL, FOX PF. Effects of high pressure on constituents and properties of milk. Int Dairy J. 2002;12(7):561-572.
- 97TRUJILLO AJ, CAPELLAS M, SALDO J, GERVILLA R, GUAMIS B. Applications of high-hydrostatic pressure on milk and dairy products: a review. Innov Food Sci-Emerg Technol. 2002;3(4):295-307.

- 98CLAEYS WL, INDRAWATI O, VAN LOEY AM, HENDRICKX M. Review: are intrinsic TTIs for thermally processed milk applicable for high-pressure processing assessment? *Innov Food Sci Emerg Technol.* 2003;4(1):1-14.
- 99BALNY C, MASSON P. Effects of high pressure on proteins. *Food Rev Int.* 1993;9(4):611-628.
- 100BALCI AT, WILBEY RA. High pressure processing of milk - the first 100 years in the development of new technology. *Int J Dairy Technol.* 1999;52(4):149-155.
- 101TEDFORD L-A, KELLY SM, PRICE NC, SCHASCHKE CJ. Interactive Effects of Pressure, Temperature and Time on Molecular Structure of  $\beta$ -Lactoglobulin. *J Food Sci.* 1999;64(3):396-399.
- 102FERTSCH B, MÜLLER M, HINRICHS J. Firmness of pressure-induced casein and whey protein gels modulated by holding time and rate of pressure release. *Innov Food Sci Emerg Technol.* 2003;4(2):143-150.
- 103PATEL HA, SINGH H, ANEMA SG, CREAMER LK. Effects of heat and high hydrostatic pressure treatments on the aggregation of whey proteins in whey protein concentrate solutions. *Food New Zealand.* 2004;4(3):29-35.
- 104PATEL H, PATEL S. Major Characteristics of Milk Powders and Test Methods. Dans: LAGRANGE V, éditeur. *Reference Manual for U.S. Milk Powders: 2005 Revised Edition.* Arlington, Virginia: Conseil des exportations des produits laitiers américains; 2005.
- 105MESSENS W, VAN CAMP J, HUYGHEBAERT A. The use of high pressure to modify the functionality of food proteins. *Trends Food Sci Technol.* 1997;8(4):107-112.
- 106HUPPERTZ T, FOX PF, KELLY AL. High pressure treatment of bovine milk: effects of casein micelles and whey proteins. *J Dairy Res.* 2004;71(1):97-106.
- 107HUPPERTZ T, FOX PF, KELLY AL. High pressure-induced denaturation of  $\alpha$ -lactalbumin and  $\beta$ -lactoglobulin in bovine milk and whey: a possible mechanism. *J Dairy Res.* 2004;71(4):489-495.
- 108WALKENSTROM P, HERMANSSON A-M. High-pressure treated mixed gels of gelatin and whey proteins. *Food Hydrocoll.* 1997;11(2):195-208.
- 109VAN CAMP J, FEYS G, HUYGHEBAERT A. High Pressure Induced Gel Formation of Haemoglobin and Whey Proteins at Elevated Temperatures. *LebensmWiss Technol.* 1996;29(1-2):49-57.
- 110VAN CAMP J, MESSENS W, CLÉMENT J, HUYGHEBAERT A. Influence of pH and Calcium Chloride on the High-Pressure-Induced Aggregation of a Whey Protein-Concentrate. *J Agric Food Chem.* 1997;45(5):1600-1607.
- 111ARIAS M, LÓPEZ-FANDIÑO R, OLANO A. Influence of pH on the effects of high pressure on milk proteins. *Milchwissenschaft.* 2000;55:191-194.
- 112PATEL HA, HUPPERTZ T. Effects of High-pressure Processing on Structure and Interactions of Milk Proteins. Dans: *Milk Proteins: From Expression to Food.* 2<sup>ème</sup> édition. Amsterdam, les Pays-Bas: Elsevier Inc.; 2014:243-267.
- 113PATEL HA, CARROLL T, KELLY AL. *Nonthermal Preservation Technologies for Dairy Applications.* Dans: CHANDAN R, éditeur. *Dairy Processing and Quality Assurance.* 2<sup>ème</sup> édition. Ames, Iowa: Wiley-Blackwell; 2015.
- 114ASHOKKUMAR M, MASON TJ, SONOCHEMISTRY. Dans: *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology.* Hoboken, New Jersey: John WILEY & Fils; 2007. doi:10.1002/0471238961.1915141519211912.a01.pub2.
- 115MUTHUKUMARAN S, KENTISH SE, ASHOKKUMAR M, STEVENS GW. Mechanisms for the ultrasonic enhancement of dairy whey ultrafiltration. *J Membrane Sci.* 2005;258(1-2):106-114.
- 116ZISU B, SCHLEYER M, CHANDRAPALA J. Applied ultrasound to reduce viscosity and control the rate of age thickening of concentrated skim milk. *Int Dairy J.* 2013;31(1):41-43.
- 117WU H, HULBERT GJ, MOUNT JR. Effects of ultrasound on milk homogenization and fermentation with yogurt starter. *Innov Food Sci Emerg Technol.* 2008;1(3):211-218.
- 118ZISU B, SCIBERRAS M, JAYASENA V, WEEKS M, PALMER M, DINCER TD. Sonocrystallisation of lactose in concentrated whey. *Ultrasonics Sonochem.* 2014;21(6):2117-2121.
- 119ARNOLD G, LEITERITZ L, ZAHN S, ROHM H. Ultrasonic cutting of cheese: Composition affects cutting work reduction and energy demand. *Int Dairy J.* 2009;19(5):314-320.
- 120PATIST A, BATES D. Ultrasonic innovations in the food industry: From the laboratory to commercial production. *Innov Food Sci Emerg Technol.* 2008;9(2):147-154.

## SOMMAIRE

SECTION	NUMÉRO DE LA PAGE
Introduction	1
La structure des protéines	2
La dénaturation des protéines	3
Les protéines du lait : identification, structure et propriétés physicochimiques	3
Les caséines	4
Les protéines de lactosérum	5
La relation structure/fonction des protéines du lait	6
Fonctionnalité des protéines du lait	8
Le traitement thermique et les protéines du lait : effets sur la fonctionnalité	10
Le traitement thermique et les protéines de lactosérum : effets sur la fonctionnalité	11
Quelques applications commerciales de traitements thermiques pour la fonctionnalité des protéines	12
Modifications non-thermique apportées aux propriétés des protéines du lait	12
Conclusion	13
Références	14