

INFLUENCE OF THERMAL TREATMENT AND IONIC FORCE ON THE PROPERTIES OF FOAMS CONTAINING SERUM PROTEINS ♦

INFLUENCE DU TRAITEMENT THERMIQUE ET DE LA FORCE IONIQUE SUR LES PROPRIETES DES MOUSSES A BASE DE PROTEINES SERIQUES

I. Nicorescu^{1*}, C. Loisel¹, C. Vial², A. Riaublanc³, G. Djelveh², G. Cuvelier⁴, J. Legrand⁵

¹ GEPEA-ENITIAA , Rue de la Géraudière, 44322, Nantes, France;

² LGCB, 24 avenue des Landais, 63174, Aubière, France;

³ INRA-BIA , Rue de la Géraudière, 44316 Nantes, France;

⁴ UMR SCALE, AgroParisTech ; 1 avenue des Olympiades, Massy, France;

⁵ GEPEA, CNRS, UMR 6144; 44602 Saint-Nazaire, France.

*Corresponding author: irina.nicorescu@enitiaa-nantes.fr

Received: 09/05/2008

Accepted after revision: 21/07/2008

Abstract: The aim of our study was to investigate the effect of dynamic thermal treatment on the denaturation and foaming properties of whey proteins, such as overrun, foam stability and texture. Three WPI solutions at 2% w/v (without or with addition of 50 mM and 100 mM NaCl) were heat-treated using a tubular heat-exchanger Actijoule at 100 °C. The native and denatured WPI samples were characterized by chromatography

♦ Paper presented at the fifth edition of: “Colloque Franco-Roumain de Chimie Appliquée – COFrRoCA 2008”, 25 – 29 June 2008, Bacău, Romania.

(SEC), dynamic light scattering (DLS) combined with microscopy (FPIA-3000) and micro-differential scanning calorimeter (μ -DSC). Then, these protein solutions were whipped to produce foams using a Kitchen Aid mixer and foam stability, viscoelastic properties and bubble sizes were measured. Experimental results demonstrated that heat treatment with or without the presence of salt do not lead at an improved overrun. On the other hand, presence of NaCl and heat treatment strongly enhanced firmness and improved foam stability (except for the foam produced from a solution at 50 mM salt). Experimental data have also shown that increasing the proportion of soluble aggregates from 8% (case of the heat treatment without salt) to 70% (case of the heat treatment in presence of 50 mM NaCl) led to a strong improvement in the firmness but also to a more rapid destabilization of foams. It can be asserted that the stability against drainage depends for a great part on controlling the optimal amount of dynamically heat-induced aggregates. A compromise for a better firmness and stability of aggregate-stabilized foams was found for an amount of 17% aggregates in the soluble fraction.

Keywords: *whey proteins isolate, thermal treatment, aggregates, protein foam, stability, microstructure.*

INTRODUCTION

Les protéines du lactosérum sont très utilisées dans le domaine de l'agroalimentaire car elles possèdent, entre autres, de bonnes propriétés fonctionnelles [2, 3]. Ces propriétés peuvent être améliorées lorsqu'un traitement thermique leur est appliqué. Les protéines sériques ainsi dénaturées se nomment *protéines sériques polymérisées*. Ces protéines pourraient agir sur la qualité et la conservation des aliments. Les protéines polymérisées intéressent donc fortement les industriels. En effet, substituer une partie de la matière sèche par des protéines de lactosérum polymérisées pourrait réduire les coûts de production tout en améliorant la qualité des produits. Les protéines de lactosérum polymérisées pourraient par exemple permettre de réduire le contenu en matière grasse des aliments tout en leur assurant de bonnes caractéristiques nutritionnelles et organoleptiques. Les industriels pourraient ainsi satisfaire les consommateurs qui sont de plus en plus sensibilisés à l'importance d'une alimentation saine.

La chaleur est l'un des principaux agents physiques causant la dénaturation des protéines. La dénaturation d'une protéine native se définit comme un changement dans sa structure tridimensionnelle, soit au niveau secondaire, tertiaire ou quaternaire. La structure des protéines peut être affectée de façon réversible ou irréversible. Une dénaturation irréversible requiert deux étapes. La première est réversible et consiste à rompre certains liens intramoléculaires de l'état natif de la protéine. Il y a une perte d'une partie de la structure tridimensionnelle. La seconde étape est le déplissement de la protéine qui mène à un ou plusieurs états dénaturés [4]. Un traitement thermique doux (près de 60 °C) permet le déplissement des protéines sériques et une exposition des groupements -SH. Un traitement thermique supérieur à 65 °C cause la dénaturation et

l'agrégation des protéines. Selon le *pH* et la force ionique de la solution, l'agrégation ou le déplissement des protéines sera favorisé. Les polymères solubles sont obtenus après avoir appliqué un traitement thermique à une dispersion protéique dans un environnement faiblement minéralisé à *pH* neutre ou alcalin. Les polymères solubles obtenus après un chauffage de 15 minutes à 95 °C présentent plusieurs caractéristiques spécifiques. Tout d'abord, leur dispersion est non sédimentables et ce, malgré une dénaturation complète des protéines. En effet, 95 % des protéines demeurent dans le surnageant après une centrifugation (20,000 g - 15 minutes). Le NaCl semble avoir deux effets opposés sur la dénaturation et l'agrégation de la β -lactoglobuline. Renard et coll. [9] et Verheul et coll. [10], montrent que le sel aurait un effet protecteur vis-à-vis de la dénaturation thermo induite de la protéine. Renard et coll. [9] expliquent la capacité du NaCl à stabiliser la β -lactoglobuline par l'aptitude des ions à favoriser la formation de dimères : la première étape de la dénaturation étant la dissociation des dimères protéiques en monomères, le NaCl ralentit cette étape d'où cet effet stabilisateur. Le NaCl semble aussi entraîner l'augmentation de la taille des agrégats formés. En effet, il est possible que le NaCl augmente la solubilité des protéines dans la solution, ce qui provoquerait une augmentation de leur déplissement, d'où une agrégation facilitée. Dans le même ordre d'idée, Aymard et al. [1] constatent qu'à *pH* 2, une augmentation de la force ionique par addition de NaCl de 0 à 30 mM permet d'accroître le taux de branchement et la flexibilité des agrégats linéaires formés à ce *pH*. Ainsi, malgré la complexité de l'effet du NaCl sur le mécanisme général d'agrégation de la protéine, les auteurs s'accordent pour affirmer qu'il existe une concentration optimale de NaCl permettant d'obtenir les meilleures conditions d'agrégation possibles et que cette concentration dépend fortement des conditions de milieu (*pH*, concentration en β -lactoglobuline, température et durée de traitement).

Toutefois, dans les ouvrages mentionnés, les protéines dénaturées et agrégées ont toujours été obtenues par des traitements thermiques en statique, ce qui diffère significativement du traitement dynamique appliqué dans l'industrie agro-alimentaire, tels que la pasteurisation HTST (high temperature short time) ou la stérilisation UHT (ultra-high temperature). À l'heure actuelle, peu d'informations sont disponibles sur l'interaction entre les mécanismes physico-chimiques de la dénaturation/agrégation des protéines sériques induite par chauffage et l'hydrodynamique des échangeurs de chaleur. En plus, on connaît peu de choses sur l'impact du traitement dynamique dans la formation d'agrégats protéiques et leur rôle dans la formation et la stabilisation des mousses.

Le but de ce travail est d'étudier les effets d'un traitement thermique dynamique en échangeur de chaleur et de la force ionique sur la dénaturation de solutions de protéines sériques (WPI), ainsi que leurs conséquences sur les propriétés des mousses de protéines telles que le taux de foisonnement, la stabilité contre le drainage et la texture.

MATERIELS ET METHODES

Dans ce travail, trois solutions à 2% w/v de protéines sériques (sans et ou avec 50 mM et 100 mM de NaCl) ont été traitées thermiquement à 100 °C dans un échangeur tubulaire (Actijoule, France). Le degré de dénaturation des solutions de WPI a été déterminé par analyse enthalpique différentielle ou AED (Setaram III, Calluire,

France) ; la chromatographie d'exclusion stérique ou SEC (HPLC Waters, USA) a permis de chiffrer la proportion d'agrégats formés dans la fraction soluble ; enfin, par diffusion dynamique de la lumière ou DLS (Nanosizer, Malvern, GB) combinée avec la microscopie (Flow Particle Image Analyzer, Sysmex FPIA-3000, Malvern, GB), il a été possible de définir la forme et la taille des agrégats.

Dans le cas des analyses par SEC ainsi que par DLS, les mesures ont été réalisées sur les surnageants (fraction soluble < 1 µm) récupérés suite à une centrifugation à 10,000 g pour une durée de 30 min. Cette étape de centrifugation a été suffisante pour éliminer tous les agrégats présentant une taille supérieure à 1 µm, ce qui sépare approximativement la fraction d'agrégats solubles de la fraction d'agrégats insolubles.

Les solutions protéiques ont été foisonnées dans un batteur ménager de type Kitchen Aid Ultra Power Mixer (Kitchen Aid, USA) pendant 10 minutes à un niveau de battage de 10. Puis les mousses ont été caractérisées par leur taux de foisonnement, leur stabilité contre le drainage (Fig. 1), leur texture par rhéométrie, ainsi que par microscopie optique afin de définir la microstructure de la mousse.

Le taux de foisonnement (*TF*) est défini par la relation suivante:

$$TF(\%) = \frac{\rho_S - \rho_M}{\rho_M} \times 100 \quad (1)$$

La stabilité contre le drainage mesure la durée de vie des mousses ; elle a été quantifiée à l'aide d'un montage expérimental composé d'une balance de précision et un ordinateur portable équipé d'un logiciel capable d'enregistrer toutes les 10 s les valeurs des gouttes de liquide drainées (figure 1).

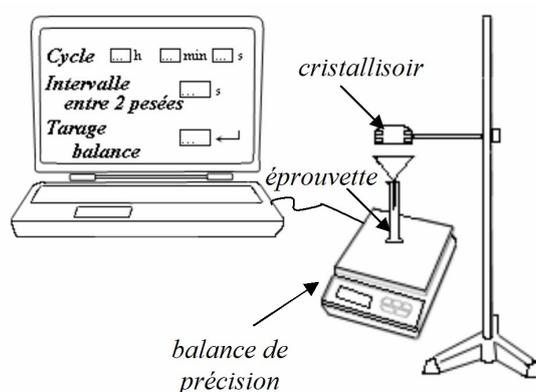


Figure 1. Schéma du dispositif de drainage

Les mesures rhéologiques effectuées dans ce travail ont été réalisées grâce à un rhéomètre à contrainte imposée AR-1000 (TA Instruments, USA) équipé d'un système plan-plan piloté au moyen d'un logiciel. La texture des mousses a été exprimée par la valeur du module élastique (*G'*) à une déformation de 0.5% et une fréquence de 1 Hz à 4 °C.

Les images des mousses, obtenues à l'aide d'un microscope Leica (Allemagne) relié à une camera CCD, ont été traitées avec le logiciel Visilog 6.2 (Noesis, France). A partir des clichés, le logiciel permet d'estimer le diamètre des bulles ainsi que la distribution

des tailles des bulles dans la mousse. Le diamètre de Sauter ($d_{3,2}$) est utilisé pour définir le diamètre moyen des bulles comme suit :

$$d_{3,2} = \frac{\sum_{i=1}^n d^3}{\sum_{i=1}^n d^2} \quad (2)$$

Pour chiffrer la capacité foisonnante des solutions de protéines sériques obtenue par battage, une technique de foisonnement par bullage (Foamsan, IT Concept) a été employée. Cette méthode expérimentale permet la mesure de l'aptitude au foisonnement des solutions protéiques et leur stabilité au cours du temps. L'appareil comporte une colonne en verre équipée de quatre électrodes permettant la mesure de la conductivité de la mousse (Fig. 2). La mousse formée est éclairée par une source lumineuse uniforme. L'image est projetée par un objectif télécentrique sur une caméra CCD, puis numérisée et visualisée par un logiciel afin de suivre l'évolution de la mousse au cours du temps.

RESULTATS

Caractérisation des solutions de protéines sériques (WPI)

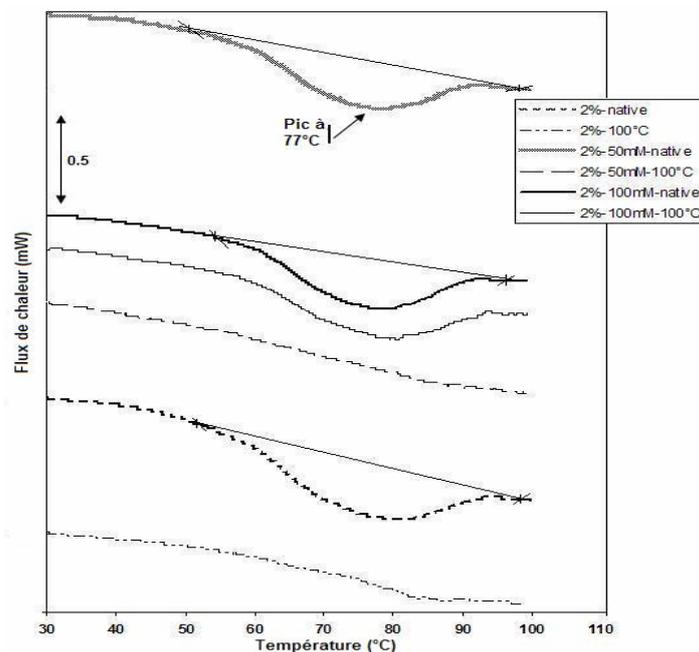


Figure 2. Thermogrammes des solutions protéiques natives ou traitées thermiquement à 100°C (avec ou sans addition de NaCl)

Le degré de dénaturation des solutions protéiques a été quantifié par μ -AED. La figure 2 présente les thermogrammes obtenus pour les solutions protéiques étudiées. Les résultats montrent que la présence de NaCl à partir d'une certaine concentration (dans

notre cas de 100 mM) protège les protéines sériques de la dénaturation. En conséquence, le degré de dénaturation dans le cas de la solution à 100 mM n'est que de 10%. En revanche, dans le cas des deux autres formulations (sans et avec 50 mM de NaCl), il est supérieur à 90%.

La population d'agrégats formés dans la fraction soluble a été étudiée par SEC sur les échantillons centrifugés. Les résultats obtenus sont présentés sous forme des courbes d'éluion des protéines natives ainsi que des agrégats protéiques (figure 3).

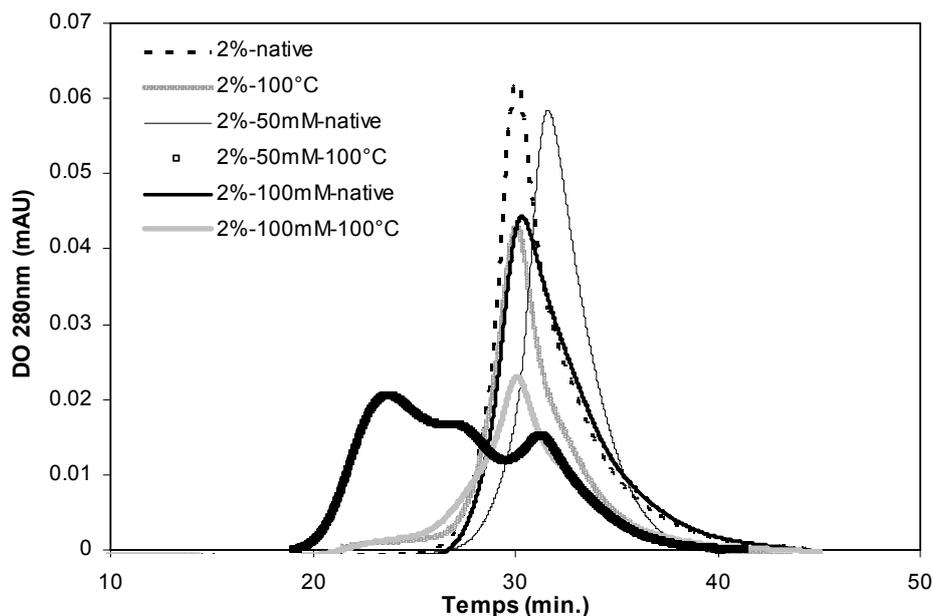


Figure 3. *Courbes d'éluion des solutions protéiques natives et traitées thermiquement à 100 °C*

Ils montrent que la proportion d'agrégats obtenus par traitement thermique dans la fraction soluble augmente tout d'abord quand on ajoute du sel dans les solutions de WPI natives. Ainsi, un ajout de 50 mM favorise la formation d'une proportion beaucoup plus importante d'agrégats dans la fraction soluble (70%). En revanche, un ajout de 100 mM conduit à la formation d'une proportion intermédiaire d'agrégats dans la fraction soluble (17%), ce qui démontre à nouveau l'effet protecteur du sel à forte concentration.

La technique de diffusion de la lumière (DLS) a été utilisée sur les échantillons centrifugés pour analyser plus en détail l'évolution de la population d'agrégats dans la fraction soluble. Dans le cas des solutions protéiques natives, un pic autour de 8 nm de diamètre moyen peut être observé et il correspond aux dimères existants dans la solution. Les résultats ont montré que l'augmentation de la température du traitement thermique favorise une agrégation progressive des petites particules vers la formation d'agrégats de diamètre moyen de 160 nm dans la fraction soluble (Figure 4).

Pour analyser la taille et la forme des agrégats protéiques inférieurs à 200 µm localisés dans la fraction insoluble, un outil de haute sensibilité, le Sysmex FPIA-3000 Flow Particle Image Analyzer, a été employé. Cette technique nous a permis d'observer que pour un traitement thermique à 100 °C en présence de 50 mM de NaCl, des agrégats fractals très cohésifs sont formés dans la fraction insoluble. Deux populations ont été

détectées (Fig. 5) : une première population correspondant à des agrégats insolubles caractérisés par un diamètre moyen proche de 80 μm et une deuxième population correspondant à de petits agrégats insolubles avec un diamètre d'environ 10 μm .

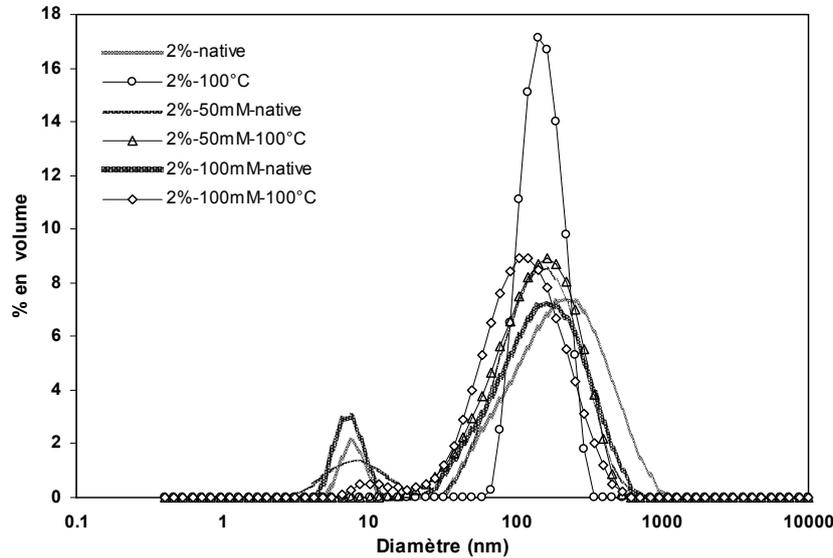


Figure 4. Distribution de tailles des particules dans des solutions protéiques natives et traitées thermiquement

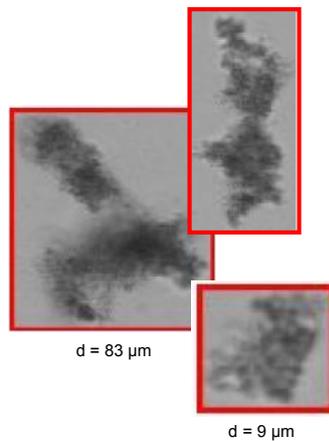


Figure 5. Images des agrégats formés dans la fraction insoluble

Propriétés foisonnantes des protéines

Les techniques de dispersion mécaniques du gaz par aspiration par le ciel sont communément utilisées comme méthode de foisonnement dans l'industrie agroalimentaire, mais celles-ci ne donnent que peu de contrôle sur la fraction de gaz incorporée dans la mousse [11]. Le bullage permet en revanche un contrôle plus précis du débit de gaz. Ainsi, le foamskan permet d'imposer un débit de gaz qui est dispersé au moyen d'un fritté. Les bulles montent au sein de la solution, formant une mousse [8]. Si cette méthode n'est vraisemblablement jamais utilisée dans l'industrie agroalimentaire pour le foisonnement, elle permet la création de mousses modèle dans lesquelles la

distribution de tailles des bulles est plus facilement maîtrisable, ce qui permet de comparer plus facilement les propriétés foisonnantes des protéines [11].

Les résultats obtenus par la mesure de la capacité foisonnante des solutions de WPI sont reportées dans la figure 6 ainsi que dans le tableau 1. Ils montrent que par rapport aux solutions natives, le temps de bullage des solutions traitées thermiquement augmente et que cette augmentation est encore plus importante en présence de NaCl (50 mM aussi bien que 100 mM). Cela indique que les solutions traitées thermiquement mettent plus de temps à former un volume fixé de mousse que les protéines natives de WPI.

La densité maximale est une estimation de l'expansion possible de la mousse au cours du processus de foisonnement, puisque une corrélation directe existe entre la densité de la mousse par bullage et le taux de foisonnement/battage [5]. Dans le cas de nos expériences, par rapport aux mousses formées à partir des solutions natives, les mousses préparées à partir des solutions dénaturées ont fait apparaître une densité plus élevée, ce qui correspond à une meilleure du liquide dans la mousse et donc à une plus grande aptitude au foisonnement.

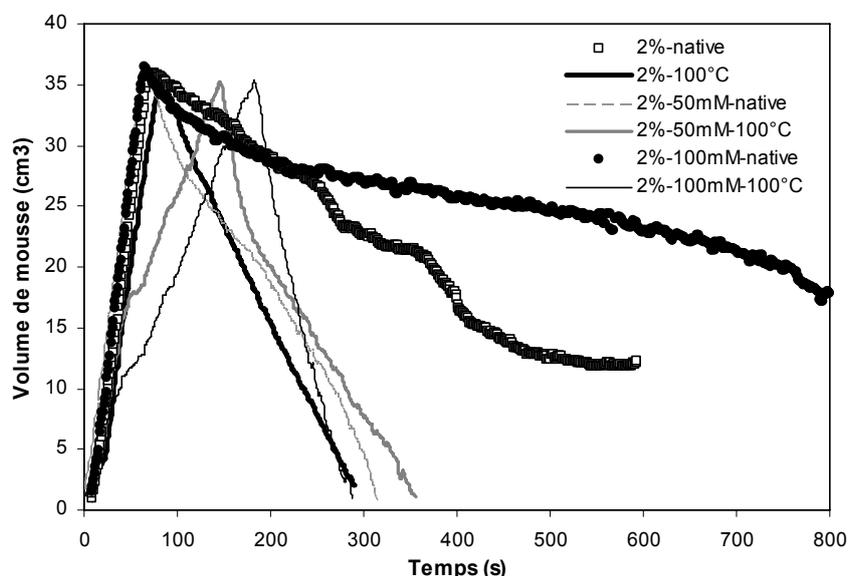


Figure 6. Propriétés foisonnantes des protéines sériques : temps de bullage et stabilité au cours du temps

Tableau 1. Propriétés foisonnantes des protéines sériques (WPI)

Type de mousse	Temps de bullage (s)	Densité maximale	Volume final de mousse après 100 s (%)	Temps de demi-vie (s)
2%-native	67	0,09	88	332
2%-100 °C	80	0,12	53,4	97
2%-50 mM-native	73	0,14	61	145
2%-50 mM-100 °C	145	0,20	37,8	76
2%-100 mM-native	63	0,18	85,7	737
2%-100 mM-100 °C	190	0,24	7,3	45

Caractérisation des mousses de protéines sériques

L'aptitude au foisonnement des solutions natives et dénaturées a été étudiée à l'aide d'un batteur ménager KitchenAid. La figure 7 montre que les mousses produites à partir de solutions dénaturées ne présentent pas d'amélioration de leur capacité foisonnante et qu'elles induisent même une légère diminution de celle-ci. En revanche, les analyses statistiques réalisées sur les échantillons étudiés ont montré une augmentation significative du taux de foisonnement pour les mousses obtenues à partir de protéines natives en présence de sel. La même tendance a déjà été observée lors de l'étude de la capacité foisonnante avec le Foamskan. Les solutions WPI traitées thermiquement semblaient nécessiter plus de temps pour former un volume de mousse fixé préalablement. Les deux techniques (KitchenAid mixer et Foamskan) donnent donc le même résultat : les agrégats formés durant le traitement thermique semble gêner la formation de la mousse. Cependant, il faut retenir que la diminution observée est bien plus faible avec le batteur mécanique qu'avec le Foamskan, ce qui démontre les limitations des extrapolations entre «bullage» et «battage».

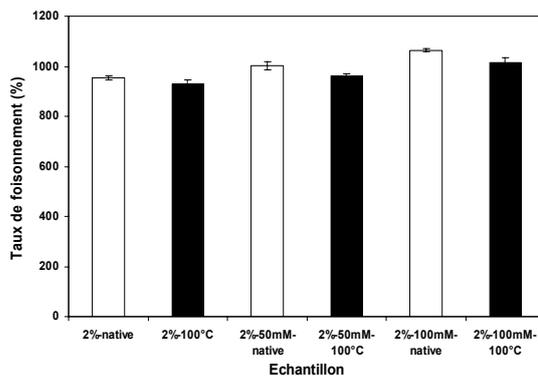


Figure 7. Evolution du taux de foisonnement dans les mousses de protéines sériques

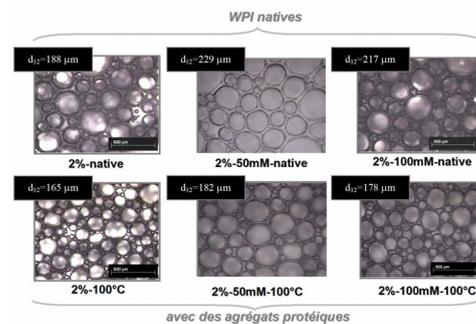


Figure 8. Images des bulles et évolution du diamètre de Sauter (d_{32}) dans les mousses de protéines sériques

L'analyse d'images a mis en évidence des différences au niveau de la microstructure entre les mousses préparées à partir des solutions natives et celles formées à partir des solutions de protéines sériques qui ont fait l'objet du traitement thermique. Des différences apparaissent au niveau des tailles moyennes des bulles, mais aussi des distributions de taille. La figure 8 montre que les mousses préparées à partir de solutions natives présentent des bulles plus grosses que les mousses obtenues lors du foisonnement des solutions dénaturées thermiquement. La présence du sel (50 mM ou bien 100 mM) dans les solutions natives, aussi bien que dans celles traitées thermiquement, conduit à une augmentation de la taille des bulles.

Une différence significative dans la distribution des tailles de bulles avant et après le traitement thermique, a été remarquée dans le cas de la formulation à 100 mM NaCl. En effet, le traitement de la solution à 2% en présence de 100 mM, conduit à une distribution plus uniforme des tailles de bulles dans la mousse (figure 9). En revanche, l'ajout du sel (50 mM ou bien 100 mM) dans une solution de protéines natives nuit à

l'uniformisation des tailles de bulles, par rapport aux mousses formées à partir de solutions sans NaCl.

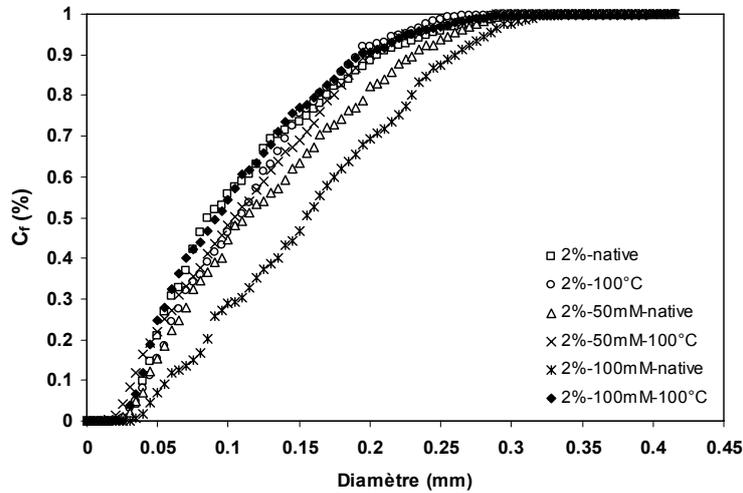


Figure 9. Distribution cumulée de taille des bulles dans les mousses de protéines

L'évolution du module élastique G' est présentée sur la figure 10. On remarque dans un premier temps une amélioration significative de la rigidité des mousses pour les échantillons soumis au traitement thermique (histogramme gris). Dans un second temps, une augmentation du module élastique G' résultant de l'augmentation de la force ionique est mise en évidence.

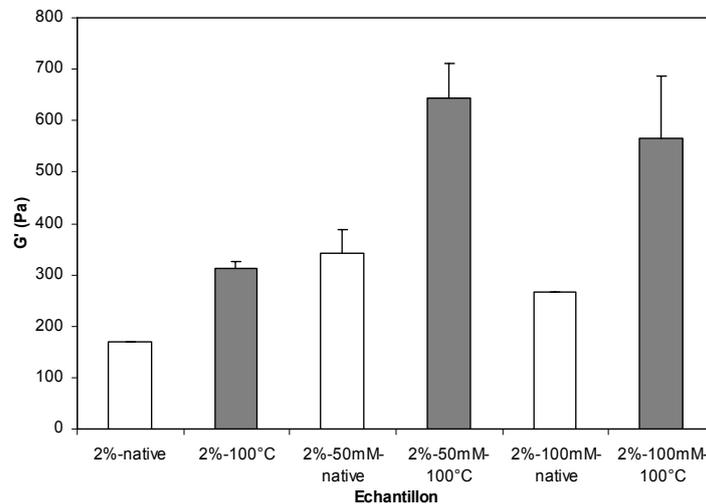


Figure 10. Evolution du module élastique G' dans les mousses de protéines sériques (à 1 Hz et 0,5% déformation)

La solution qui contient la proportion la plus élevée d'agrégats solubles (2% - 50 mM-100 °C) est celle qui présente la fermeté la plus élevée. Puisque la fraction de gaz est

presque constante, on peut conclure que ce sont les agrégats solubles formés au cours du traitement thermique qui ont fortement amélioré la texture des mousses.

En revanche, pour cette même formulation, la stabilité contre le drainage, exprimée ici par le temps d'apparition de la première goutte, diminue fortement (figure 11). Il semble donc qu'une proportion trop élevée d'agrégats solubles ou bien insolubles nuise à la stabilité des mousses, alors qu'une quantité plus faible semble au contraire accroître la stabilité dans le temps des mousses de protéines.

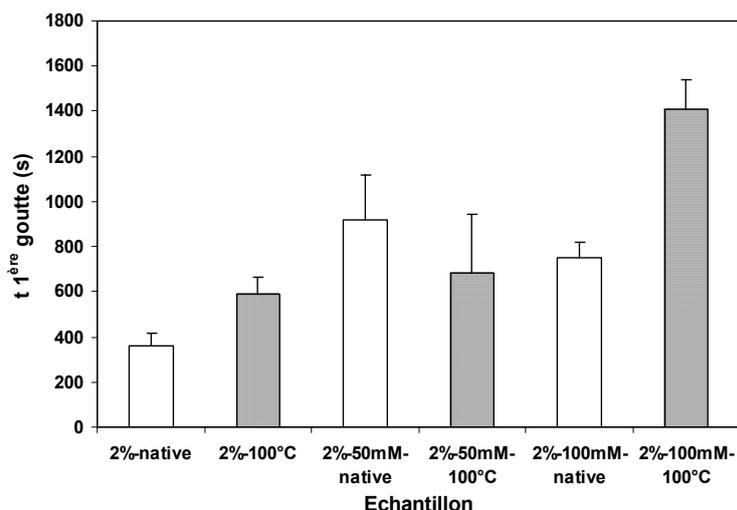


Figure 11. Evolution de la stabilité contre le drainage des mousses de protéines sériques

DISCUSSION

Le traitement thermique des protéines globulaires tel que la β -lactoglobuline, constitue une voie intéressante afin d'améliorer ses propriétés fonctionnelles, particulièrement la texture et la stabilité des aliments présentant une structure de mousses. Les résultats expérimentaux présentés dans cette étude ont mis en évidence un effet significatif du traitement thermique sur les propriétés des mousses. La μ -AED a montré qu'à faible force ionique (absence de NaCl ou bien en présence de 50 mM NaCl), la solution de protéines sériques subit une dénaturation complète, alors qu'une force ionique élevée (en présence de 100 mM NaCl) protège les protéines sériques de la dénaturation. Dans ce dernier cas, le degré de dénaturation trouvé suite au traitement thermique appliqué a été seulement de 10%. Les résultats obtenus par SEC montrent clairement que la plus importante proportion d'agrégats solubles a été atteinte pour le traitement thermique d'une solution à 50 mM NaCl ; toutefois, les mousses formées à partir de cette solution traitée ont montré une déstabilisation plus rapide (figure 11). La tendance à l'effondrement de la mousse semble augmenter quand la proportion d'agrégats dans la fraction soluble est élevée (70% w/w). En revanche, une proportion élevée d'agrégats solubles formés dans le cas de la solution à 50 mM NaCl modifie fortement la texture de la mousse, puisque les agrégats viennent augmenter sa fermeté (figure 10).

Il semble donc que la maîtrise de la proportion d'agrégats formés dans la fraction soluble est primordiale pour la formation d'une mousse ferme et stable. Dans notre étude, une valeur de 17% w/w d'agrégats solubles semble correspondre à un compromis entre la formation des mousses à la fois stables et fermes. Dans un tel système, il peut y avoir des interactions entre les agrégats de plusieurs interfaces, ce qui aboutit vraisemblablement à la formation d'un réseau de bulles liées entre elles par des agrégats qui forment des clusters. La force de ce réseau dépend de la quantité d'agrégats solubles présents, ce qui explique pourquoi il y a un optimum de stabilité. Si la proportion d'agrégats est trop élevée (70% w/w, par exemple), on n'observe plus expérimentalement un simple drainage du liquide, mais une chute brutale de fractions cohérentes de mousse. En effet, une proportion trop élevée d'agrégats dans la fraction soluble semble conduire à la formation de larges structures cohérentes dans la mousse qui vont tomber en bloc pendant les expériences de drainage, comme des solides. Ceci confirme la formation d'un réseau bulles/agrégats, mais avec une cohésion tellement forte qu'elle nuit en fin de compte à la stabilité de la mousse. Une autre raison susceptible d'expliquer la déstabilisation des mousses à forte teneur en agrégats protéiques est la présence d'une quantité importante d'agrégats insolubles qui croît avec la proportion d'agrégats solubles. Même si les agrégats insolubles vont préférentiellement se placer aux bords de Plateau, on peut faire l'hypothèse que leur taille et leur forme peuvent entraîner une déformation des films liquides et ainsi accélérer le processus de déstructuration de la mousse. En effet, les images des agrégats qui ont été obtenues par microscopie couplée à diffusion de la lumière nous ont montré que les agrégats insolubles sont plutôt compacts et ramifiés, ce qui pourrait jouer un rôle clé dans la déstabilisation des mousses en pontant plusieurs interfaces, comme un agent antimousse.

En revanche, le taux de foisonnement des mousses dépend peu du traitement thermique puisque les mousses produites à partir de solutions dénaturées ne présentent pas d'amélioration ; elles enregistrent même une légère diminution de leur capacité foisonnante. Zhu et Damodaran [12] ont montré que ce sont les protéines solubles non agrégées qui contribuent à la formation de la mousse et elles commencent faire défaut après le traitement thermique, ce qui pourrait expliquer la légère diminution dans l'aptitude au foisonnement observée dans notre travail après traitement.

L'effet du traitement thermique sur la taille des bulles a été peu étudié jusqu'au présent. Hagolle et coll. [6] ont observé une distribution plus uniforme des tailles de bulles pour les mousses à base de blanc d'œuf chauffé à 70 °C, alors que Indrawati et coll. [7] ont remarqué une augmentation significative du diamètre moyen des bulles dans les mousses de protéines sériques qui ont subi préalablement un traitement thermique, mais ils ont réalisé un foisonnement à chaud, contrairement à ce qui est fait dans ce travail. La diminution du diamètre de Sauter décrite précédemment, ainsi que la répartition plus uniforme des bulles dans les mousses à base de WPI dénaturées par rapport aux mousses formées à partir de solutions natives de WPI à taux de foisonnement constant confirme la capacité des agrégats à mieux stabiliser les interfaces et à améliorer la texture des mousses par une grande élasticité interfaciale.

CONCLUSIONS

Les résultats expérimentaux ont montré que le traitement thermique, en l'absence aussi bien qu'en présence de sel, n'améliore pas le taux de foisonnement. En revanche, effectuer un traitement thermique en présence d'une quantité importante de NaCl (100 mM) améliore fortement la texture ainsi que la stabilité des mousses. Les données expérimentales ont montré aussi que passer d'une proportion de 8% (cas du traitement thermique sans sel) à une proportion de 70% agrégats solubles (cas du traitement thermique en présence de 50 mM) conduit à une forte amélioration de la fermeté mais aussi à une plus rapide déstabilisation des mousses, alors que l'on améliore à la fois la texture et la stabilité lorsque la proportion des agrégats est de 17% (100 mM). Une force ionique élevée permet donc de limiter la dénaturation et l'agrégation des protéines à traitement thermique fixé. De même, on a donc pu constater que la stabilité des mousses contre le drainage dépend fortement de la maîtrise de la proportion d'agrégats solubles et qu'il existe un optimum de stabilité assurant à la fois une plus grande fermeté et une meilleure stabilité dans le temps.

En conclusion, le traitement thermique et la force ionique jouent un rôle important sur les phénomènes de dénaturation et d'agrégation des protéines, ainsi que sur la durée de vie et la texture des mousses de protéines. A taux de foisonnement constant, ce qui est le cas de nos expériences, nous avons pu mettre en évidence le rôle clé des agrégats protéiques solubles puisque la rigidité et la stabilité des mousses produites à partir des solutions dénaturées sont améliorées par rapport aux mousses formées à partir de solutions natives lorsqu'il y a 17% d'agrégats solubles. La transposition de ces résultats à l'échelle industrielle devrait permettre d'améliorer la stabilité et les propriétés organoleptiques des aliments présentant une structure de mousse.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Aymard, P., Durand, D., Nicolai, T.: The effect of temperature and ionic strength on the dimerisation of β -lactoglobulin, *International Journal of Biological Macromolecules*, **1996**, 19, 213–221;
2. Bottomley, R.C., Evans, M.T.A., Parkinson, C.J.: Whey Proteins. In: "*Food Gels*", (Ed. P. Harris), Elsevier Applied Science, London, **1990**;
3. de Wit, J.N.: Functional properties of whey proteins in food systems, *Netherlands Milk and Dairy Journal*, **1984**, 38, 71–89;
4. Galani, D., Owusu Apenten, R.K.: Revised equilibrium thermodynamic parameters for thermal denaturation of β -lactoglobulin at pH 2.6, *Thermochimica Acta*, **2000**, 363, 137–142;
5. German, J.B., O'Neill, T.E., Kinsella, J.E.: Film forming and foaming behavior of food proteins, *Journal of the American Oil Chemists' Society*, **1985**, 62, 1358–1366;
6. Hagolle, N., Relkin, P., Popineau, Y., Bertrand, D.: Study of the stability of egg white protein-based foams: effect of heating protein solution, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **2000**, 80, 1245–1252;

7. Indrawati, L., Wang, Z., Narsimhan, G., Gonzalez, J.: Effect of processing parameters on foam formation using a continuous system with a mechanical whipper, *Journal of Food Engineering*, **2008**, article in press;
8. Pugh, R.J.: Foaming, foam films, antifoaming and defoaming, *Advances in Colloid and Interface Science*, **1996**, 64, 67–142;
9. Renard, D., Lefebvre, J., Griffin, M.C.A., Griffin, W.G.: Effects of *pH* and salt environment on the association of β -lactoglobulin revealed by intrinsic fluorescence studies, *International Journal of Biological Macromolecules*, **1998**, 22, 41–49;
10. Verheul, M., Roefs, S.P.F.M., de Kruif, K.G.: Kinetics of heat-induced aggregation of β -lactoglobulin, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **1998**, 46, 896–903;
11. Wilde, P.J., Clark, D.C.: In: G.M. Hall, Editor, *Methods of testing protein functionality*, Blackie Academic and Professional, London, **1996**, 110–152;
12. Zhu, H., Damodaran, S.: Heat-induced conformational changes in whey protein isolate and its relation to foaming properties, *Journal of Agriculture Food Chemistry*, **1994**, 42, 846–855.