FOCUS : Émulsions alimentaires foisonnées

Impact de la technologie et des conditions du foisonnement sur l'élaboration de mousses laitières de type « topping »

M. Labbafi^{1,5}, H. Bouaouina², C. Vial^{1*}, G. Djelveh¹, L. Picgirard³, J. Casalinho⁴, C. Schorsch⁴

SUMMARY

Impact of technology and whipping conditions on dairy topping fabrication

The continuous manufacturing of dairy toppings has been studied using first the conventional industrial technology, the axial rotor-stator mixer. The influence of process parameters including operating pressure, residence time and rotational speed has been investigated in terms of overrun, bubble size distribution, as well as foam texture and stability using a model dairy emulsion. The performance of the rotor-stator mixer has then been confronted to that of alternative technologies, such as narrow gap annular columns and scraped surface heat exchangers.

Experimental results have highlighted the significant role of operating pressure, the ambiguous role of high residence times that make easier the achievement of desired overrun values, but provide larger bubble sizes, and also the negative interaction between high rotational speed and high residence times. Scale effects have been quantified using a generalized Reynolds number that takes into account the shear-thinning behaviour of the emulsion, the increase in viscosity due to the gas phase and all the geometrical characteristics of a rotor-stator unit. The results have also shown that scraped surface heat exchangers constitute an attractive alternative to other foaming devices: they behave globally as a rotor-stator unit with long residence time, but provide foams with smaller bubble sizes than other types of units.

Keywords

aeration, foamed emulsions, foaming process, dairy foam.

RÉSUMÉ

Le foisonnement d'une émulsion laitière a été étudié dans le but de produire en continu des mousses de type « topping » de dessert lacté. Dans un premier temps, l'opération a été conduite sur une technologie industrielle standard, le foisonneur axial de type rotor-stator, pour lequel l'influence des paramètres procédés a été étudiée en

1. LGCB – Univ. B.-Pascal – 24, av. des Landais – BP 206 – 63174 Aubière cedex – France.
2. GEPEA-ENITIAA – Rue de la Géraudière – BP 82225 – 44322 Nantes cedex 3 – France.
3. ADIV – 2, rue Chappe – 63039 Clermont-Ferrand cedex 2 – France.
4. Danone Vitapole – RD 128 – 91767 Palaiseau cedex – France.
5. Dépt. Technologie Alimentaire – Université de Téhéran – Téhéran – Iran.

* Correspondance : christophe.vial@univ-bpclermont.fr

termes de taux de foisonnement, distribution des tailles de bulles, texture et stabilité des mousses. Ce système a été ensuite comparé à des technologies alternatives, telles que les colonnes agitées à faible entrefer et les échangeurs à surface raclée.

Les résultats ont montré la forte influence de la pression de fonctionnement, le rôle contrasté des longs temps de séjour qui facilitent l'incorporation de la quantité de gaz désirée, mais se traduisent par des tailles de bulles plus larges, ainsi que l'interaction négative entre les fortes vitesses d'agitation et les longs temps de séjour sur le système rotor-stator. Les effets liés au changement d'échelle ont été quantifiés en se fondant sur un nombre de Reynolds généralisé qui tient compte du caractère rhéofluidifiant de l'émulsion, de l'augmentation de sa viscosité due à la présence du gaz et de toutes les dimensions caractéristiques des systèmes rotor-stator. Enfin, on a montré que l'échangeur à surface raclée constitue une alternative intéressante au système standard : il a un comportement global proche de celui d'une unité rotor-stator, mais forme des mousses avec des tailles de bulles plus faibles que les autres types de foisonneurs.

Mots clés

aération, émulsions foisonnées, foisonnement, mousse laitière.

1 – INTRODUCTION

La production industrielle de mousses laitières semblables à la crème chantilly, tels que les « toppings » de dessert lacté, nécessite un grand nombre de traitements thermomécaniques successifs. On rencontre fréquemment des étapes d'émulsification, d'homogénéisation sous pression et de stérilisation souvent entrecoupés par des périodes de maturation en amont du foisonnement et du conditionnement du produit. L'étape de foisonnement consiste à disperser et stabiliser une phase gaz dans une émulsion, en général au moyen d'une agitation mécanique intense connue traditionnellement sous le nom de « battage ». En pratique, la production industrielle de mousses laitières s'appuie sur des foisonneurs continus qui n'ont que peu de points communs avec les batteurs ménagers ou industriels. Le système le plus utilisé est le foisonneur de type rotor-stator axial à dents. Il s'agit d'un système rotatif à faible entrefer dans lequel à la fois le rotor et le stator sont équipés de dents disposées orthogonalement à l'axe de rotation dans le but de favoriser simultanément mélange et dispersion (figure 1a). Bien que très répandus, leurs performances restent encore difficiles à prédire car ils n'ont été que peu étudiés. Pour cette raison, ils sont généralement mis en œuvre sous pression à des vitesses de rotation élevées, alors qu'il n'y a aucune preuve tangible que de tels niveaux de contraintes mécaniques et d'énergie dissipée soient indispensables. Comme les émulsions alimentaires sont rhéofluidifiantes, voire parfois thixotropes, il se pourrait même que de fortes vitesses de cisaillement soient inutiles ou même néfastes du point de vue de la stabilité des mousses. De plus, il n'y a que peu de travaux sur les technologies alternatives au foisonneur rotor-stator dans la littérature. Seul l'échangeur à surface raclée (ESR) est utilisé, mais presque uniquement pour le foisonnement des crèmes glacées (RUSSELL *et al.*, 1999).

Les objectifs de ce travail sont donc de caractériser les performances d'un système rotor-stator axial en termes de mélange et de puissance dissipée, puis d'étudier l'influence des conditions opératoires du foisonnement en continu (pression d'opération, vitesse d'agitation, temps de séjour) et du changement d'échelle sur la fabrication d'un topping de dessert lacté au moyen d'une unité rotor-stator. La qualité du foisonnement en continu sera estimée en se fondant sur le taux de foisonnement atteint, l'uniformité de la distribution des tailles de bulles, ainsi que la texture et la stabilité du produit foisonné obtenu et elle sera reliée à la puissance dissipée par l'agitation. Les performances des systèmes rotor-stator seront également comparées à celles de technologies alternatives susceptibles de favoriser la dispersion d'un gaz dans un fluide complexe : les colonnes agitées à faible entrefer (CA) et les ESRs.

Figure 1

Schéma de principe des foisonneurs de type (a) rotor-stator axial à dents (RSM et RSP), (b) colonne agitée à faible entrefer (CA), (c) échangeur à surface raclée (ESR).

Schematic description of the three whipping devices (a) axial rotor-stator unit equipped with pins (RSM et RSP), (b) narrow annular gap stirred column (CA), (c) scraped surface heat exchanger (ESR).

2 – MATÉRIELS ET MÉTHODES

L'émulsion utilisée dans ce travail a la composition massique suivante : 20 % de matière grasse laitière anhydre ou MGLA (Lactalis, France), 15 % de sucre (Beghin-Say, France), 6,5 % de poudre de lait écrémé (Lactalis, France), 0,35 % d'émulsifiants E472b (Degussa, France) et 0,2 % d'agents stabilisants dont 0,1 % de guar, 0,05 % de xanthane et 0,05 % de carraghénanes (Rhodia Food, France). Sa préparation nécessite la dissolution à chaud de la MGLA (70 °C) dans laquelle est ajouté l'émulsifiant, l'ensemble étant progressivement incorporé dans une phase aqueuse contenant les autres ingrédients et émulsifié à 80 °C au moyen d'une turbine équipée d'un stator pendant 10 minutes. La pré-émulsion obtenue est ensuite homogénéisée sous pression au moyen d'un homogénéisateur à deux étages (APV France) fonctionnant à 100 bars sur le premier effet et 10 bars sur le deuxième. L'émulsion homogénéisée a été traitée thermiquement à 130 °C pendant 30 secondes, puis refroidie rapidement jusqu'à 4 °C avant stockage et une éventuelle période de maturation (de 0 à 24 heures). Chaque préparation a été caractérisée en termes de propriétés rhéologiques et de distribution des tailles de des globules gras. Les propriétés rhéologiques ont été mesurées à 4 °C en conditions d'écoulement (de 0,01 à 10³ s⁻¹) et à faible déformation (modules viscoélastiques G', G'' et tangente de perte tanδ à 1 % de déformation entre 0,01 et 20 Hz). La distribution des tailles des globules gras a été estimée par la technique classique de diffusion de la lumière (Mastersizer 2000, Malvern, R-U) dans une solution à 1 % (w/v) de dodécyle sulfate de sodium afin de défloculer les émulsions.

Ces émulsions ont été foisonnées sur deux systèmes rotor-stator à dents (figure 1a), une maquette (RSM) et une unité pilote (RSP) de façon à étudier l'influence du changement d'échelle. Leurs caractéristiques géométriques sont reportées dans le tableau 1.

L'opération a toujours été conduite sous pression (2 à 5 bars) avec une vitesse d'agitation comprise entre 200 et 2000 rpm. Pour tous les essais, le rapport des débits volumiques de gaz (azote) et de liquide a été maintenu constant de façon à obtenir un taux de foisonnement¹ maximal $\Phi_{\max}$ égal à 180 %, correspondant à une incorporation totale du gaz. On rappelle qu'en foisonnement continu, si l'on néglige l'influence de la pression de Laplace dans les bulles, cette grandeur s'estime approximativement par

$$\Phi_{\max} = \frac{G}{L} \quad (1)$$

où L et G sont respectivement les débits volumique d'émulsions et de gaz à pression atmosphérique. L'influence des débits a été étudiée indépendamment de la pression d'opération aux deux échelles au moyen d'un temps de séjour apparent τ défini à partir du volume utile du foisonneur V par

$$\tau = \frac{V}{L + G} \quad (2)$$

que l'on a fait varier entre 50 et 250 s sur les deux systèmes. En parallèle, le foisonnement en continu a été conduit dans une colonne agitée à faible entrefer (CA, figure 1b) et un ESR (type TR 6 × 60, SA Duprat & Cie, France) (figure 1c) dont les caractéristiques géométriques sont résumées dans le tableau 1. Tous les systèmes utilisés dans ce travail sont équipés d'une double enveloppe alimentée en fluide réfrigérant qui a permis de limiter l'augmentation de température due à l'énergie dissipée par l'agitation.

Tableau 1

Paramètres géométriques des différents foisonneurs : deux unités rotor-stator à dents incluant une maquette (RSM) et une unité pilote (RSP), une colonne agitée à faible entrefer (CA) et un échangeur à surface raclée (ESR).

Table 1

Geometrical characteristics of the whipping devices: two rotor-stator units including a lab-scale (RSM) and a pilot-scale (RSP) device, a narrow annular gap stirred column (CA) and a scraped surface heat exchanger (ESR).

	RSM	RSP	CA	ESR
Raclage parois	non	non	non	oui
Rangées de dents sur rotor (r)	7	7	-	-
Nombre de dents par rangée (m)	6	10	-	-
Dimensions des dents (l × d × d)	7,5 × 4 × 4 mm	20 × 5 × 5 mm	-	-
Entrefer axial entre dents (e)	2,5 mm	2,5 mm	-	-
Nombre de pales	-	-	4	2
Diamètre stator	35 mm	80 mm	60 mm	60 mm
Diamètre rotor	15 mm	35 mm	40 mm	40 mm
Diamètre rotor + dents (D)	30 mm	75 mm	-	-
Type de pales	-	-	droites	inclinaées
Diamètre des pales	-	-	56 mm	-
Longueur totale (L)	180 mm	180 mm	600 mm	600 mm
Volume utile (V)	70 ml	373 ml	1,25 l	1,25 l

1. Le taux de foisonnement est le rapport du volume de mousse formée au volume d'émulsion nécessaire.

Les mousses formées ont été caractérisées en sortie de foisonneur en terme de taux de foisonnement Φ par la technique classique de densimétrie (THAKUR *et al.*, 2005), en terme de texture par rhéométrie en cisaillement à faible déformation (modules viscoélastiques G' et G'' à 1 % de déformation entre 0,1 et 20 Hz), et enfin à partir de la distribution des tailles et les morphologies des bulles par microscopie optique couplée avec une analyse d'images (THAKUR *et al.*, 2005). Les distributions de taille étant monomodales et les bulles sphériques, la qualité de la dispersion du gaz a été chiffrée à partir du diamètre moyen des bulles d_b . La granulométrie des globules gras dans les mousses a été mesurée par granulométrie laser dans les mêmes conditions expérimentales que les émulsions. Enfin, la stabilité des mousses a été quantifiée à partir de l'évolution dans le temps du taux de foisonnement à $J + 7$ et $J + 21$.

Les foisonneurs rotor/stator ont été caractérisés en termes de mélange à partir la mesure de la puissance dissipée par l'agitation et de la « Distribution des Temps de Séjour » (DTS). La puissance dissipée par l'agitation dans les différents foisonneurs a été mesurée, tout d'abord sur des fluides modèles newtoniens et non newtoniens en l'absence de gaz, puis au cours du foisonnement à partir d'une mesure de couple sur l'axe du rotor (THAKUR *et al.*, 2004). La qualité du mélange dans la phase liquide a été estimée uniquement sur des fluides modèles en l'absence de gaz à partir d'une mesure de la DTS fondée sur une technique conductimétrique en appliquant la procédure utilisée par THAKUR *et al.* (2005).

3 – CARACTÉRISATION DES ÉMULSIONS

Les émulsions utilisées pour le foisonnement ont une masse volumique voisine de $1\,050 \pm 25 \text{ kg.m}^{-3}$ et sont des fluides rhéofluidifiants dont le comportement peut donc être représenté en première approximation par une loi d'Ostwald à deux paramètres : l'indice d'écoulement (n , sans dimension) et l'indice de consistance (k en Pa.s^n). Les paramètres $n = 0,285$ et $k = 44,2 \text{ Pa.s}^{0,285}$ permettent d'estimer la viscosité des émulsions à $\pm 10 \%$ près dans la gamme d'intérêt du foisonnement, de 10 à $1\,000 \text{ s}^{-1}$ (figure 2a). À faible déformation, elles montrent un domaine linéaire restreint (déformation inférieure à 2 % à 1 Hz). Dans ce domaine, elles présentent un caractère viscoélastique prononcé ($\tan \delta \approx 0,40 \pm 0,05$), bien que leur niveau d'élasticité reste faible ($G' \approx 40 \pm 10 \text{ Pa}$). Les spectres mécaniques montrent un comportement de type gel faible ($G' > G''$) à 1 % de déformation, mais qui devient purement fluide au-delà de 5%. Les distributions de taille des globules gras sont monomodales avec un diamètre médian en volume compris entre 0,7 et $1,1 \mu\text{m}$ (figure 2b). Elles sont assez resserrées, la quasi-totalité des gouttelettes ayant un diamètre d_v compris dans la décade 0,2-2,0 μm . Les propriétés rhéologiques ainsi que la granulométrie laser montrent une bonne reproductibilité de la préparation de l'émulsion chez les différents partenaires, le GEPEA et Danone Vitapole (figure 2).

4 – CARACTÉRISATION DES FOISONNEURS ROTOR-STATOR

Jusqu'à présent, les seules informations disponibles dans la littérature sur le mélange et la dispersion de gaz dans les systèmes rotor-stator à dents axiaux sont celles de KROEZEN et GROOT WASSINK (1987), KROEZEN *et al.* (1988), WINDHAB (1991), HANSELMANN et WINDHAB (1999) ainsi que celle de MÜLLER-FISCHER et WINDHAB (2005). En pratique, seules les deux dernières concernent le domaine de l'agroalimentaire et aucune n'a traité le cas des émulsions foisonnées. Le principal obstacle à l'étude des systèmes rotor-stator à dents est la complexité de leur géométrie : en plus des paramètres classiques de l'agitation-mélange, tels que les diamètres du rotor et du stator, il faut également tenir compte du nombre de rangées de dents sur le rotor et le stator, du nombre de dents par rangées et de la géométrie des dents (tableau 1). Même en l'absence de gaz, il n'existe toujours

aucune formulation universellement acceptée permettant de relier la puissance dissipée à la géométrie et à la vitesse d'agitation. À cela s'ajoute la complexité intrinsèque de l'opération de foisonnement qui met en jeu une phase gaz dispersée dans des fluides rhéologiquement complexes et qui, à côté de la technologie mise en œuvre, nécessite la prise en compte des interactions entre la mécanique des fluides, la rhéologie et la physico-chimie des ingrédients, tout d'abord au sein de la phase continue, mais également aux interfaces eau-air ainsi qu'aux interfaces eau-globules gras dans le cas des émulsions. Malgré les efforts de description de ces phénomènes, notamment dans les contributions d'HANSELMANN et WINDHAB (1999) et de MÜLLER-FISCHER et WINDHAB (2005), l'opération de foisonnement reste encore mal comprise, quelle que soit la technologie employée.

Figure 2

Propriétés physico-chimiques des émulsions servant de base à l'élaboration de « toppings » de dessert lacté : (a) évolution de la viscosité (η) en fonction du gradient de vitesse ($\dot{\gamma}$) ; (b) distribution de la fraction volumique (f_v) des gouttelettes en fonction de leur diamètre (d_v). La reproductibilité de l'émulsion a été étudiée en comparant plusieurs lots (1, 2, 3) produits sur plusieurs sites (DANONE et GEPEA).

Physico-chemical properties of the emulsions used for the manufacturing of dairy toppings: (a) evolution of viscosity (η) as a function of shear rate ($\dot{\gamma}$); (b) distribution of fat volume fraction (f_v) as a function of droplet diameter (d_v). The reproducibility of emulsion preparation has been studied by comparing several lots (1, 2, 3) prepared on different sites (GEPEA and DANONE).

En se fondant sur les travaux de KROEZEN *et al.* (1988) sur les systèmes rotor-stator, la puissance dissipée par une agitation mécanique a été corrélée à la vitesse d'agitation et à la géométrie des équipements par une courbe de puissance qui relie un nombre adimensionnel de Newton **Ne**

$$\text{Ne} = \frac{P_0}{N^3 D^4 \cdot l \cdot d} \cdot \frac{(\pi \cdot D - m \cdot d)}{m \cdot r} \quad (3)$$

à un nombre adimensionnel de Reynolds **Re** pour des fluides newtoniens (figure 3a)

$$\text{Re} = \frac{\rho N \cdot D \cdot e}{k} \cdot \left(71 + 553 \cdot \frac{e}{\sqrt{D \cdot d}} \right)^{-1} \quad (4)$$

où ρ est la masse volumique du fluide (kg.m^{-3}), N la vitesse d'agitation (s^{-1}) et P_0 la puissance transmise au fluide (W), k l'indice de consistance (Pa.s^n), tandis que d , D , e , l , m , r sont des paramètres géométriques définis dans le tableau 1.

Une courbe généralisée étendue aux fluides non newtoniens peut cependant être obtenue à partir d'une « analogie de Couette » qui consiste à déterminer la géométrie de Couette virtuelle qui a le même diamètre de stator et consomme la même quantité d'énergie que le système rotor-stator (THAKUR *et al.*, 2004b). Dans cette géométrie virtuelle, on peut montrer qu'il existe une coordonnée radiale unique, r_0 , telle que le gradient de vitesse soit très peu sensible à l'indice d'écoulement quelle que soit la vitesse d'agitation. Le paramètre r_0 peut être obtenu par optimisation à partir d'une base de données expérimentales combinant des fluides newtoniens (huiles H1 à H5) et non newtoniens suivant une loi d'Ostwald (solutions de xanthane, guar, polyacrylamide...) qui ont été définis par THAKUR *et al.* (2004). Il permet de déduire la constante adimensionnelle de cisaillement K_S qui intervient dans le nombre de Reynolds généralisé Re_g défini tel que $Re_g = Re$ si $n = 1$:

$$Re_g = \frac{\rho N^{2-n} D \cdot e}{k \cdot K_S^{n-1}} \cdot \left(71 + 553 \cdot \frac{e}{\sqrt{D \cdot d}} \right)^{-1} \quad (5)$$

Les expériences réalisées sur la maquette RSM mettant en jeu les mêmes fluides que THAKUR *et al.* (2004) ont montré que $K_S = 51 \pm 1$, ce qui a permis de construire la courbe de puissance généralisée (figure 3b). Ils font apparaître classiquement une zone laminaire de pente proche de -1 lorsque $Re_g < 5 \cdot 10^{-2}$ suivie d'une région de transition. Ils sont en très bon accord avec ceux de KROEZEN *et al.* (1988) sur toute la gamme de Re_g étudiée. En revanche, l'accord avec les données d'HANSELMANN et WINDHAB (1999) est limité au régime laminaire (figure 3). Les résultats de DTS confirment la transition de régime entre $Re_g = 4 \cdot 10^{-2}$ et $Re_g = 1,2 \cdot 10^{-1}$ et montrent l'absence d'une transition entre une zone laminaire pure et un régime de Taylor dans la région de pente -1 de la courbe : en effet, la dispersion axiale augmente progressivement avec Re_g entre 10^{-3} et 10^{-2} (figure 4a), alors que les essais ont clairement fait apparaître une diminution nette de la dispersion lorsque Re_g dépasse $4 \cdot 10^{-2}$ (figure 4b). Ces résultats ne sont pratiquement pas affectés par les changements de temps de séjour, ce qui confirme que la puissance transmise par l'écoulement axial est négligeable devant celle fournie par l'agitation, même aux faibles temps de séjour lorsque les pertes de charge sont importantes.

Figure 3

Courbe de puissance d'un foisonneur rotor-stator axial à dents :
(a) pour les fluides newtoniens ; (b) généralisée aux fluides non newtoniens.

Power curve of a rotor-stator unit: (a) for Newtonian fluids;
(b) extended to non-Newtonian fluids.

Figure 4

Courbes de réponses en concentrations normalisées (C^+) à une injection échelon en fonction du temps normalisé (t^+) : (a) pour un fluide newtonien ($2.10^{-3} < Re < 2.10^{-2}$) ; (b) pour un fluide rhéofluidifiant suivant une loi d'Ostwald ($4.10^{-2} < Re_g < 2.10^{-1}$).

Step-input response curve expressed as a normalized concentration (C^+) as a function of the normalized time (t^+): (a) for a Newtonian fluid ($2.10^{-3} < Re < 2.10^{-2}$); (b) for a non-Newtonian fluid exhibiting an Ostwald law ($4.10^{-2} < Re_g < 2.10^{-1}$).

5 – FOISONNEMENT AVEC UN SYSTÈME ROTOR-STATOR

5.1 Effet de la vitesse d'agitation

Les résultats obtenus sur la maquette pour un temps de séjour court sont en accord avec les considérations théoriques. En effet, on considère intuitivement que les contraintes mécaniques, donc l'énergie dissipée, augmentent avec N , ce qui devrait favoriser la dispersion du gaz sous forme de bulles plus petites dont la taille finale résulte de l'équilibre dynamique entre les effets hydrodynamiques et les forces interfaciales (telles que tension de surface, mais aussi les effets élastiques des couches adsorbées). La figure 5 confirme que le foisonnement est amélioré par une augmentation de la vitesse d'agitation sur les préparations des différents partenaires pour la maquette RSM avec des temps de séjour courts (figure 5a), ce qui s'accompagne d'une diminution de la taille moyenne des bulles (figure 5b). Toutefois, des résultats opposés sont observés à la fois sur le pilote RSP à des temps de séjour courts (GEPEA2-RSP sur la figure 5) ainsi que sur la maquette RSM à des temps de séjour longs (figure 6), ce qui montre que ce raisonnement n'est pas valable dans un cas général car il ne tient compte ni du temps de séjour, ni des transitions de régime hydrodynamiques, ni du caractère rhéofluidifiant des fluides et notamment de la dépendance entre les valeurs locales de la viscosité et la géométrie du foisonneur. Ces résultats pourraient éventuellement découler d'une désorption des protéines qui a déjà été observée dans le cas de traitements mécaniques trop sévères (DICKINSON, 1987).

Globalement, tous les produits formés dans les conditions des figures 5 et 6 ont été stables jusqu'à $J + 21$. Du point de vue texture, on retiendra que les mousses stables ont des G' compris entre 1 000 et 3 000 Pa en sortie de foisonneur, ce qui est de 20 à 100 fois supérieur aux valeurs de l'émulsion d'origine. Si G' diminue fortement en cours

de stockage, même à taux de foisonnement constant, cela provient notamment du mûrissement des bulles et de la relaxation des contraintes liées aux effets de surface. Toutefois, on notera que le G' d'une mousse reste en général au moins 10 fois supérieur au G' de son émulsion de base au bout de 21 jours dans le cas de produits stables.

5.2 Effet de la pression d'opération

Les résultats préliminaires ayant montré que le foisonnement à 180 % n'est pas possible en dessous d'une pression minimale de 2 bars, une étude a été menée sur l'effet de la pression entre 2 et 4 bars. La pression permet, en jouant sur la compressibilité du gaz, de réduire la fraction volumique occupée effectivement par le gaz dans le foisonneur. Ainsi, on passe dans le cas d'un taux de foisonnement cible de 180 % d'une fraction volumique de gaz de 64,3 % à pression atmosphérique à une valeur de 31,0 % à 4 bars, ce qui devrait faciliter grandement la dispersibilité du gaz. L'inconvénient des pressions d'opération élevées est lié au retour à l'atmosphère de la mousse qui doit nécessairement être progressif et éviter ainsi une déstructuration engendrée par une détente trop brutale. Ces effets contradictoires tendraient à laisser présager l'existence d'une valeur optimale de la pression de fonctionnement. Cette hypothèse est confirmée par les résultats expérimentaux qui montrent une amélioration du taux de foisonnement avec la pression (figure 6a), ce qui correspond à des tailles de bulles minimales pour une pression d'opération de 3 bars (figure 6b).

Figure 5

Influence de la vitesse d'agitation sur la maquette (RSM) et le pilote (RSP) à temps de séjour (50 s) et pression (3 bars) fixés : (a) taux de foisonnement (Φ) ; (b) diamètre de bulles (d_b).

Influence of rotational speed on the lab-scale (RSM) and pilot-scale (RSP) devices at constant residence time (50 s) and pressure (3 bars): (a) overrun (Φ); (b) bubble diameter (d_b).

Figure 6

Influence de la pression d'opération sur le foisonnement sur la maquette (RSM) à temps de séjour fixé (250 s) : (a) taux de foisonnement (Φ) ; (b) diamètre de bulles (d_b).

Influence of operating pressure on the lab-scale whipping device (RSM) at constant residence time (250 s): (a) overrun (Φ); (b) bubble diameter (d_b).

5.3 Effet du temps de séjour

Les résultats expérimentaux obtenus sur la maquette (figure 7a) montrent clairement qu'il est plus facile d'assurer le taux foisonnement cible au temps de séjour le plus long. Aux temps de séjour courts, il est probable qu'on forme dans certaines conditions une mousse hétérogène dans laquelle une faible fraction du gaz est présente sous forme de grosses bulles non sphériques. Celles-ci sont en général éliminées lors de la mise en place du produit foisonné. Sachant que l'augmentation de la fraction volumique de gaz de 60 % à 64,3 % dans la mousse sous pression atmosphérique correspond à une augmentation du taux de foisonnement de 150 % à 180 %, il suffit d'un très faible nombre de ces grosses bulles pour réduire considérablement Φ dans le produit final. En revanche, un résultat plus surprenant est que la taille moyenne des bulles est plus élevée dans le cas des temps de séjour longs dès que la vitesse d'agitation dépasse 500 tpm (figure 7b). Il semble que l'allongement du temps de séjour favorise la coalescence dynamique vis-à-vis de dispersion, ce qui est négatif en terme de stabilité à long terme des mousses. Cela est confirmé par l'interaction négative entre les temps de séjour longs et les vitesses d'agitation élevées qui a déjà été mentionnée au paragraphe 5.1 (figures 6b et 7b). Ce comportement peut provenir du caractère rhéofluidifiant des émulsions, la viscosité devenant trop faible sous agitation intense pour favoriser la dispersion du gaz, mais également de la désorption des protéines aux interfaces décrite par DICKINSON (1987) sous forte agitation. En conclusion, il apparaît qu'il existe vraisemblablement, comme pour la pression, un temps de séjour optimal pour lequel il se produit une dispersion complète du gaz tout en limitant la recoalescence des bulles.

Figure 7

Influence du temps de séjour sur la maquette (RSM) à pression (3 bars) fixée :
(a) taux de foisonnement (Φ) ; (b) diamètre de bulles (d_b).

Influence of residence time on the lab-scale whipping device (RSM) at constant pressure (3 bars): (a) overrun (Φ); (b) bubble diameter (d_b).

5.4 Effets d'échelle

La seule règle pratique communément acceptée dans la littérature est que le foisonnement en continu semble favorisé par le régime turbulent, qu'il est possible en régime laminaire, mais qu'il est fortement défavorisé dans la région de transition (KROEZEN *et al.*, 1988). Pour valider cette hypothèse, il est nécessaire de calculer les valeurs de Re_g sur l'unité pilote RSP. Dans ce but, on a estimé la valeur de K_S (RSP) à partir de K_S (RSM) en considérant que seules la largeur des dents (d) et le diamètre du rotor (D) avaient été modifiés (tableau 1) et supposé que K_S varie proportionnellement à D (hypothèse de Couette). Pour le calcul des propriétés rhéologiques des mousses, on a fait l'hypothèse d'un modèle de type Krieger-Dougherty qui suppose que la viscosité de la mousse η_m est proportionnelle à celle de l'émulsion η_e via un facteur correctif C_F dépendant du degré de vide de la mousse $\Phi/(1+\Phi)$ et d'une constante Φ_{sup} (équation 6).

$$\eta_m = C_F \cdot \eta_e = \eta_e \cdot \left(1 + \left(\frac{\Phi}{\Phi_{sup}} \right) \cdot \left(\frac{1 + \Phi_{sup}}{1 + \Phi} \right) \right)^{-\frac{2,5(1+\Phi_{sup})}{\Phi_{sup}}} \quad (6)$$

Le facteur C_F est donc constant lorsque le taux de foisonnement est fixé à 180 %. Il a été estimé à partir des mesures de couple réalisées en cours de foisonnement sur la maquette. Celles-ci ont montré que C_F est proche de 10 pour $\Phi = 180$ %.

Les résultats obtenus sont reportés sur la figure 8. Ils montrent que le taux de foisonnement diminue brusquement lorsque $Re_g > 0,01$ alors que KROEZEN *et al.* (1988) suggéreraient que la région de transition défavorable au foisonnement était située entre $0,02 < Re_g < 0,15$ en conditions de foisonnement. Compte tenu des approximations réalisées et selon les figures 3 et 4, la valeur limite obtenue de 0,01 pour le début de la transition semble donc être en très bon accord avec leurs résultats. En conclusion, la figure 8 a permis de mettre en évidence et de quantifier les difficultés liées à l'extrapolation de l'opération de foisonnement des émulsions servant de base aux toppings de dessert lacté, notamment la présence d'une transition de régime liée au changement d'échelle.

Les résultats sont en accord avec ceux obtenus dans la littérature sur des mousses employées pour l'imprégnation des textiles (KROEZEN *et al.*, 1988), ce qui permet d'envisager une généralisation des critères obtenus dans le futur. Celle-ci nécessitera toutefois une variation dans une gamme assez large de la composition de l'émulsion étudiée, ce qui sort du cadre du présent travail.

Figure 8

Effets d'échelle ($50 \text{ s} < \tau < 250 \text{ s}$) sur le taux de foisonnement (Φ) et le diamètre de bulles (d_b).

Scale effects ($50 \text{ s} < \tau < 250 \text{ s}$) on overrun (Φ) and bubble diameter (d_b).

6 – FOISONNEMENT PAR LES TECHNOLOGIES ALTERNATIVES

6.1 Colonne agitée à faible entrefer

Dans ce système, à cause du volume utile plus important que les unités rotor-stator, les temps de séjour étudiés sont compris entre 4 et 10 minutes. En terme de taux de foisonnement, les résultats ont montré un effet positif de la pression d'opération. L'objectif de 180 % n'a jamais pu être atteint en dessous de 4 bars. Ils ont également permis de mettre en évidence un effet positif de la vitesse d'agitation et des longs temps de séjour sur la quantité de gaz incorporée (figure 9a). En revanche, ils ont montré que l'accroissement du taux de foisonnement s'accompagne d'une augmentation de la taille moyenne de bulles à 4 bars, ce qui conduit à des produits présentant une stabilité faible pendant la conservation (figure 9b). Les modules élastiques G' des mousses formées sont par ailleurs le plus souvent inférieurs à 1 000 Pa en sortie de foisonneur, ce qui est en accord avec le résultat précédent. En conséquence, les colonnes agitées aérées ne semblent pas constituer une alternative intéressante au foisonneur rotor-stator pour la production de toppings de produits laitiers, du moins pour la géométrie utilisée dans ce travail.

Figure 9

Effets combinés de la pression, de la vitesse d'agitation et du temps de séjour sur le foisonnement dans une colonne agitée à faible entrefer :
(a) taux de foisonnement (Φ) ; (b) diamètre de bulles (d_b).

Combined effects of pressure, rotational speed and residence time on whipping in a narrow annular gap stirred column: (a) overrun (Φ); (b) bubble diameter (d_b).

6.2 Échangeur à surface raclée

Une étude entre 1 et 4 bars a permis de mettre en évidence une zone optimale entre 2 et 3 bars pour la pression d'opération. Contrairement à ce qui a été observé pour la colonne agitée à faible entrefer, le foisonnement est favorisé par des vitesses de rotation faibles, vers 300-400 rpm (figure 10a), quels que soient la pression et le temps de séjour (ce dernier a été étudié dans la même gamme que pour la colonne agitée, 4 min $< \tau < 10$ min). Ceci est en accord avec les résultats obtenus pour les temps de séjour longs (supérieurs à 120 s) sur RSM (paragraphe 5.1 et 5.3). Par rapport aux autres types de foisonneurs, la vitesse d'agitation présente une influence plus faible sur la taille des bulles. Si l'on se place dans la gamme optimale des vitesses (300-400 rpm) pour laquelle l'objectif de 180 % est toujours atteint, on observe une diminution attendue de la taille moyenne des bulles lorsque la pression de fonctionnement augmente, mais surtout un effet marqué du temps de séjour sur la largeur des distributions des tailles de bulles. En effet, les temps de séjour longs conduisent systématiquement à des distributions plus larges, ce qui se traduit en général par des tailles moyennes de bulles plus élevées (figure 10b). Du point de vue texture, la plupart des mousses formées présentent un module élastique G' supérieur à 1000 Pa, ce qui constitue en général une indication de bonne stabilité à long terme du produit foisonné. Un autre indicateur de stabilité est la faible taille moyenne des bulles observée sur l'ensemble des expériences (figure 10b) qui est toujours plus faible que celles mesurées en sortie sur tous les autres foisonneurs (figures 5b, 6b, 7b, 8b et 9b). En conclusion, l'échangeur à surface raclée apparaît comme une alternative possible aux systèmes rotor-stator pour ce type d'émulsion. On remarquera que globalement, son comportement en termes de pression d'opération et de vitesse d'agitation semble similaire à celui des systèmes rotor-stator fonctionnant avec un temps de séjour long, mais qu'il permet d'obtenir des tailles moyennes de bulles plus faibles, de l'ordre de 20-40 μm .

Figure 10

Effets combinés de la pression, de la vitesse d'agitation et du temps de séjour sur le foisonnement dans un échangeur à surface raclée : (a) taux de foisonnement (Φ) ; (b) diamètre de bulles (d_b).

Combined effects of pressure, rotational speed and residence time on whipping in a scraped surface heat exchanger: (a) overrun (Φ); (b) bubble diameter (d_b).

7 – CONCLUSION

Dans ce travail, on a mis en évidence l'influence des conditions opératoires du foisonnement d'une émulsion servant de base à l'élaboration d'un topping de dessert lacté. On a montré l'existence d'une pression opératoire et d'un temps de séjour optimaux sur le taux de foisonnement et la taille des bulles, ainsi que l'effet ambigu de la vitesse qui peut être positif ou négatif selon le temps de séjour sur un foisonneur rotor-stator axial à dents. Celui-ci a été expliqué par un déplacement de l'équilibre coalescence-rupture vers la recalescence aux longs temps de séjour. Les effets d'échelle ont également été mis en évidence, et notamment ceux liés aux transitions de régime dues à l'extrapolation. Ils ont été quantifiés à partir d'un nombre de Reynolds généralisé qui tient compte à la fois de la viscosité de l'émulsion, de celle de la mousse et de l'ensemble de la géométrie du foisonneur. Les résultats ont également montré que les échangeurs à surface raclée constituent une alternative possible aux systèmes rotor-stator car ils ont un comportement qualitativement similaire au système standard fonctionnant avec un long temps de séjour, mais permettent une réduction supplémentaire de la taille moyenne des bulles. Des travaux complémentaires sont maintenant nécessaires afin d'étudier l'applicabilité de ces résultats à d'autres types d'émulsions.

8 – REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé par le ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche dans le cadre du Programme CANAL-Stabilité des émulsions, des suspensions et des systèmes colloïdaux aérés (SEA) du Réseau technologique RARE.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- DICKINSON E., 1987. *Food emulsions and foams*, Royal Society of Chemistry, London.
- HANSELMANN W., WINDHAB E., 1999. Flow characteristics and modeling of foam generation in a continuous rotor/stator mixer. *J. Food Eng.*, **38**, 393-405.
- KROEZEN A.B.J., GROOT WASSINK J., 1987. Bubble size distribution and energy dissipation in foam mixers. *JSDC*, **103**, 387-394.
- KROEZEN A.B.J., GROOT WASSINK J., BERLEIN E., 1988. Foam generation in a rotor-stator mixer. *Chem. Eng. Process.*, **21**, 145-156.
- MÜLLER-FISCHER, WINDHAB E.J., 2005. Influence of process parameters on microstructure of food foam whipped in a rotor-stator device within a wide static pressure range. *Coll. and Surf. A: Physicochem and Eng. Aspects*, **263**, 353-362.
- RUSSELL A.B., CHENEY, P.E., WANTLING, S.D., 1999. Influence of freezing conditions on ice crystallisation in ice cream, *J. Food Eng.*, **39**, 179-191.
- THAKUR R.K., VIAL Ch., DJELVEH G., 2003. Influence of operating conditions and impeller design on the continuous manufacturing of foam foods. *J. Food Eng.*, **60**, 9-20.
- THAKUR R.K., VIAL Ch., DJELVEH G., LABBAFI M., 2004. Influence of impeller geometry and highly shear thinning behavior on mixing of complex fluids with flat-bladed impellers. *Chem. Eng. Process.*, **43**, 1211-1222.
- THAKUR R.K., VIAL Ch., DJELVEH G., 2005. Combined effects of process parameters and composition on foaming of dairy emulsions at low temperature in an agitated column. *J. Food Eng.*, **68**, 335-345.
- WINDHAB E., 1991, Zur Technologie geschäumter Stoofsysteme im Lebensmittelbereich – Teil II. *Lebensmitteltechnik*, **4**, 181-183.