

**FOAMING OF MODEL MEDIUMS IN LAMINAR FLOW:
COMPARISON BETWEEN A ROTOR-STATOR UNIT
AND AN AGITATED COLUMN WITH A NARROW
ANNULAR GAP***

**FOISSONNEMENT DE MILIEUX MODELES EN REGIME
LAMINAIRE : COMPARAISON ENTRE UNE UNITE
ROTOR-STATOR ET UNE COLONNE AGITEE
A FAIBLE ENTREFER**

Issa Narchi*, Christophe Vial, Gholamreza Djelveh

*Université Blaise Pascal, Laboratoire de Génie Chimique et Biochimique,
24, avenue des Landais, BP 206, 63174 AUBIERE Cedex, France*

*Corresponding author: narchi.issa@univ-bpclermont.fr
Tel: +33 473 40 79 54; Fax : +33 473 40 78 29

Received: 19/05/2008

Accepted after revision: 24/07/2008

Abstract: Foamed food products, such as chocolate mousse, ice cream and spread cheese are more and more popular because of their sensorial properties. Their behavior under flow, their stability over time and the perception of their properties by the consumers depend strongly on the gas fraction, the average bubble diameter and the bubble size distribution within the matrix. In this work, the objective is to compare the performances of two different continuous foaming devices. The first one is

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

a rotor-stator unit equipped with pins, whereas the second consists of a narrow annular gap unit simulating a scraped surface heat exchanger. Both devices allow to vary the rotation speed between 200 rpm and 1600 rpm and the gas to liquid flow rate ratio (G/L) between 10/30 and 30/30 (mL.min⁻¹)/(mL.min⁻¹). This allows obtaining overrun values in the final product that vary between 33% and 100%. Moreover, the two devices are connected to an on-line image analysis system, which makes it possible to determine the mean bubble diameter (d_{32}) as well as the size distribution within the foamed product. The model matrix is a Newtonian glucose syrup (1 Pa.s) containing 2% (w/w) whey protein (WPI). The influence of the foaming device, the operating conditions and the formulation viscosity were analyzed using the Weber number. Concerning the gas incorporation, the experimental results showed that both devices allowed a total incorporation of the gas phase with an overrun of 100%. However, when G/L = 30/30, the column made it possible to obtain total gas incorporation only for 800 rpm. In the rotor-stator, total incorporation was difficult only at high rotation speed for G/L = 30/30. For bubble size, results showed that d_{32} was smaller in the column than in the rotor-stator for G/L = 10/30, but that this difference vanished for higher G/L ratio. In both devices, the minimum diameter obtained was slightly lower than 20 µm. Lastly, this work highlighted that the dimensionless Weber number remained constant around 0.3 for the both devices, regardless of operating conditions. The results also showed that the energy transmitted to the fluid was significantly higher in the column than in the rotor-stator. Moreover, total energy dissipation, including mechanical friction, was almost identical in the two devices when G was low and for low rotation speeds. Beyond 1200 rpm, energy consumption was higher in the column and this was accentuated for high G/L ratio. In conclusion, the choice of a foaming unit and the operating conditions depends on the desired properties in terms of overrun, stability and bubble size. The energy criterion, often ignored, can also be discriminating.

Keywords: *foam, gas dispersion, foaming process, power input, rotor - stator.*

INTRODUCTION

L'utilisation de bulles de gaz dispersées dans un liquide sous forme d'une mousse est très ancienne si l'on se remémore le fait que la bière ou encore le pain sont des mousses. Par exemple, la mousse de bière est connue depuis les années 1700 et la crème glacée a été développée au cours du 17^{ème} siècle [1]. En fait, la présence de gaz confère à un aliment de meilleures propriétés organoleptiques et elle est capable de produire des textures nouvelles [2]. De plus, l'aération donne accès à une nouvelle gamme de produits alimentaires « basse calorie » appréciés par le consommateur en substituant, à volume constant, de la matière sèche par l'air. Le but du procédé de foisonnement en

continu est d'incorporer, de disperser en régime permanent et de stabiliser une phase gaz au sein d'une phase liquide ou semi-solide continue afin d'obtenir une mousse présentant la structure et les propriétés souhaitées. Toutefois, la création et la stabilisation des mousses dépendent, en plus de la technologie et des conditions opératoires, de la maîtrise des propriétés interfaciales et de la rhéologie de la phase continue. En particulier, il existe une forte interaction entre la formulation et le procédé. Dans l'industrie agroalimentaire, le foisonnement est généralement effectué dans des unités de mélange traditionnelles qui sont efficaces, mais ne sont pas forcément les plus adaptées. En ce qui concerne le procédé, les systèmes en batch sont souvent utilisés pour étudier le foisonnement à l'échelle du laboratoire [3 – 5] et pour les productions artisanales. Par exemple, l'utilisation de batteurs ménagers classiques est très répandue chez les ménages, mais aussi dans les laboratoires de recherche et développement car ils sont très simples d'utilisation. Dans ce type d'appareil, la fraction volumique de gaz présente dans le produit final est contrôlée à partir du temps de battage et de la vitesse de rotation du fouet. A l'inverse, le procédé de foisonnement en continu est largement utilisé à l'échelle industrielle car il permet un contrôle plus facile de la quantité de gaz à incorporer et il permet également d'obtenir une plus grande reproductibilité des propriétés du produit final que le foisonnement en batch. Globalement, les appareils utilisés pour le foisonnement en continu sont soit de type rotor-stator [6], soit de type échangeur à surface raclée [7]. La différence essentielle entre ces deux types de dispositifs concerne d'une part le taux de cisaillement et d'autre part le temps de séjour. Dans le cas du rotor-stator, le taux de cisaillement est uniformément élevé et le temps de séjour est court, alors que dans les échangeurs à surface raclée, le taux de cisaillement est localement plus élevé, mais plus faible en moyenne, et le temps de séjour est plus long que dans les rotor-stator. Pour l'instant, il n'y a pas de règle établie qui permette de décider quel cisaillement et quel temps de séjour doivent être utilisés lors du foisonnement en continu d'une matière première alimentaire. Il en va de même pour le choix d'une technologie. En effet, la littérature est quasiment inexistante, aussi bien sur les procédés batch que continus.

Du point de vue de la formulation, la plupart des produits foisonnés sont élaborés grâce à la dispersion d'un gaz dans une matrice qui contient des protéines, de la matière grasse, des polysaccharides, des minéraux, etc. Ainsi, la compréhension du rôle de chaque ingrédient sur les propriétés physicochimiques de systèmes aussi complexes et de leurs interactions avec les paramètres du procédé devrait constituer un préalable indispensable afin de prédire la capacité foisonnante de la phase continue. Toutefois, même s'il existe un nombre important de travaux sur les propriétés interfaciales et rhéologiques d'un ingrédient ou d'un couple d'ingrédients dans l'eau en relation avec le foisonnement et la stabilisation des interfaces air/eau [8 – 11], beaucoup de questions restent sans réponse sur l'influence de chaque ingrédient en mélange et sur le lien entre la formulation et les conditions opératoires dans un dispositif donné pendant l'opération de foisonnement. Seules des approches empiriques sont donc possibles.

En cours de foisonnement, le mécanisme de division d'une bulle dépend du régime d'écoulement. Si le régime turbulent est plus favorable au procédé de foisonnement, il est parfois difficile d'atteindre ce régime quand la formulation présente une viscosité élevée, ce qui est souvent le cas dans le domaine de l'agroalimentaire. En régime laminaire, la division d'une bulle est due aux forces hydrodynamiques résultant du champ de cisaillement (γ) induit par l'agitation. La principale force hydrodynamique

résulte de la viscosité de la phase continue (η) et de la pression qu'elle exerce sur la bulle ($\eta\gamma$). Pour une bulle de diamètre d , lorsque cette pression dépasse la pression de Laplace (σ/d), la bulle peut se diviser, ce qui permet de définir un nombre adimensionnel de Weber ($We = \eta\gamma d/\sigma$).

L'influence des paramètres de procédé sur les propriétés des mousses alimentaires, tels que la géométrie du dispositif de foisonnement et les conditions opératoires (vitesse d'agitation, temps de séjour, etc.) a été abordée au cours de travaux récents sur le foisonnement des émulsions alimentaires [12, 13]. La performance de l'opération de foisonnement en régime laminaire a été reliée à la force de cisaillement appliquée dans un échangeur à surface raclée et un rotor-stator qui sont des appareils types utilisés dans l'industrie. Dans les deux dispositifs, on a montré que la vitesse de cisaillement est proportionnelle à la vitesse de rotation de l'agitateur.

Maintenant, l'objectif de cette étude est de travailler en régime laminaire en utilisant un aliment modèle visqueux de comportement Newtonien afin de comparer les performances de deux dispositifs de foisonnement en continu sous pression atmosphérique et à température ambiante. Les débits de gaz et de la phase continue, ainsi que, la vitesse d'agitation ont été modifiés afin de comparer ces deux technologies dans une gamme assez large de conditions opératoires. La quantité de gaz incorporé, la taille et la distribution des tailles de bulles, ainsi que la stabilité des mousses dans le temps et la consommation énergétique des deux dispositifs ont été utilisés comme paramètres de comparaison.

MATERIELS ET METHODES

Dispositifs de foisonnement

Une installation de type rotor-stator a été utilisée dans un premier temps pour réaliser le foisonnement en continu. Le corps du rotor-stator est en acier inoxydable avec un système rotor et un stator équipés tous deux de dents à bouts carrés. Le diamètre de stator est de 35 mm alors que le diamètre de rotor est de 10 mm. Le rotor et le stator sont munis de sept rangées de six dents (7,5 x 4 x 4 mm). Les entrefers axial et radial entre le rotor et le stator sont de 2,5 mm. Le rotor est relié au moteur IK Labortechnik RE-16 (Ikawerke, Allemagne) dont la vitesse d'agitation peut être variée entre 200 et 1600 tpm. Le moteur est équipé d'une jauge de contrainte IK MR-D1 (Ikavisc, Allemagne) permettant la mesure du couple résistant sur l'axe. Le milieu modèle est introduit dans le dispositif de foisonnement à l'aide d'une pompe péristaltique (Cole-Parmer Instr. Co., USA) à débit constant de 30 mL.min⁻¹. La phase gaz est introduite à la base du dispositif à l'aide d'un débitmètre massique (Emerson Brooks, USA) avec un débit qui a été varié de 10 à 30 mL.min⁻¹. Le dispositif de foisonnement est muni d'une double enveloppe dans laquelle circule un réfrigérant fourni par un cryostat WKL300 (Lauda, Allemagne) qui permet de maintenir une température de sortie constante. Le régime permanent est atteint lorsque la densité des mousses ainsi que les mesures du couple restent constantes pour trois mesures successives.

Le foisonnement a également été effectué dans une colonne simulant un échangeur à surface raclée dans les mêmes conditions opératoires que pour l'unité rotor-stator. Ce

dispositif a déjà été décrit pour la première fois par Djelveh et Gros [9] et a été utilisé dans plusieurs études [13, 14].

Analyses et caractérisation du milieu modèle et du produit foisonné

Un aliment modèle à base d'un sirop de glucose (Glucidex IT21, Roquette Frères, France) contenant 2% (w/w) d'isolat de protéines sériques (WPI) (Protarmor 865, Armor Protéines, France) a été utilisé comme fluide Newtonien. La viscosité de la phase continue a été ajustée entre 1 et 2 Pa.s à 25 °C. Les densités du liquide et des mousses (respectivement ρ_L et ρ_m) ont été déterminées en remplissant un récipient de 25 mL et en le pesant. Ces mesures ont été effectuées trois fois pour minimiser l'erreur sur le prélèvement. Ensuite, la tension de surface a été mesurée par la méthode de la lame de Wilhelmy en utilisant un tensiomètre K-12 (Kruss GmbH, Allemagne). La température des fluides pendant la mesure est maintenue à l'aide d'un bain thermostaté Haake K20 (ThermoElectron, Allemagne). Après le passage dans les dispositifs de foisonnement, le taux de foisonnement (Φ) et la fraction volumique du gaz (ε) des mousses ont été déterminés à l'aide des mesures de densité, respectivement selon les équations 1 et 2.

$$\phi = \frac{\rho_L - \rho_F}{\rho_F} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\rho_L - \rho_F}{\rho_L} \quad (2)$$

La mesure de la fraction volumique de gaz a permis de déterminer l'efficacité de foisonnement selon l'équation 3.

$$\text{eff} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}} \quad (3)$$

avec

$$\varepsilon_{\max} = \frac{G}{L + G}$$

La microstructure de la mousse a été étudiée à l'aide d'un système d'analyse d'images en-ligne reposant sur la microscopie optique. La méthode développée au sein du LGCB est originale car elle permet de prendre des clichés du produit en-ligne à la sortie du foisonneur. Il s'agit d'une cellule en quartz de faible épaisseur qui est placée sur la platine d'un microscope inversé à contraste de phase (Zeiss, Allemagne). Le microscope est équipé d'une camera CCD (Kappa, Allemagne) reliée à un logiciel d'acquisition ImagePro+ 4.01 (Media Cybernetics, MD, USA). Pour chaque ensemble de conditions opératoires, un minimum de trois images ont été prises pendant le foisonnement. Le diamètre moyen des bulles a été défini comme le diamètre de Sauter selon l'équation (4) en utilisant 1500 bulles au minimum en fonction du taux de foisonnement. L'écart-type a été utilisé pour caractériser la largeur des distributions des tailles des bulles.

$$d_{32} = \frac{\sum d_i^3}{\sum d_i^2} \quad (4)$$

Enfin, la stabilité des mousses a été déterminée en suivant au cours du temps, l'évolution de 25 mL de la mousse dans une éprouvette graduée à température ambiante. Le drainage du liquide couplé au crémage des bulles a été observé sur 24 heures.

Détermination de la consommation énergétique

La mesure du couple (C) et la vitesse d'agitation (N) ont permis de déterminer la puissance consommée à partir de l'équation (5).

$$P = 2\pi NC \quad (5)$$

Deux valeurs de couple ont été utilisées : le couple mesuré qui permet d'étudier l'énergie totale consommée par le dispositif, mais aussi la valeur du couple transmis au fluide, après soustraction du couple à vide qui mesure les frottements mécaniques. L'énergie consommée dans les deux cas est déterminée à l'aide de l'équation (6) où V est le volume du foisonneur.

$$E = P * \frac{V}{L(1 + \Phi)} \quad (6)$$

Analyse dimensionnelle

Le nombre de Weber (We) a été utilisé pour relier les interactions entre les paramètres de procédé et la formulation selon l'équation (7).

$$We = \frac{\mu(K_s N)d_{32}}{\sigma} \quad (7)$$

N est la vitesse d'agitation. La viscosité prise en compte dans cette équation est celle du mélange gaz-liquide (μ), ou viscosité du procédé, mesurée pendant le foisonnement à partir du couple et définie par l'équation (8).

$$\mu = \frac{C}{2\pi r_o^2 \cdot L_o \cdot K_s N} \quad (8)$$

Où r_o , L_o et K_s sont des paramètres propres à chaque foisonneur.

RESULTATS

Effet du dispositif du foisonnement sur l'incorporation du gaz

Pour les deux dispositifs, une incorporation totale du gaz jusqu'à un taux de foisonnement de 33% pour une efficacité de foisonnement de 100% peut être atteinte, notamment entre 800 et 1200 tpm pour $G/L = 10/30$. Toutefois, les résultats montrent que pour le rotor-stator, l'efficacité du foisonnement ne dépasse pas 82% lorsque la vitesse est supérieure à 1200 tpm. A l'inverse, dans la colonne de foisonnement, une baisse de eff est observée à faible vitesse d'agitation : elle varie entre 92% et 94% lorsque N varie entre 200 et 600 tpm. Il semble clair qu'il est plus difficile d'incorporer

le gaz à forte vitesse d'agitation dans le rotor-stator, alors que c'est à faible vitesse d'agitation que ce phénomène se produit dans la colonne.

Lorsque la fraction volumique de gaz recherchée passe à 40% pour $G/L = 20/30$, l'incorporation totale du gaz est toujours obtenue dans les deux dispositifs avec un taux de foisonnement de 67% pour une efficacité de foisonnement de 100%. Toutefois, la différence d'efficacité de foisonnement observée précédemment en fonction de la vitesse d'agitation est renforcée. Dans le rotor-stator, l'efficacité chute à 97% puis à 72% pour une vitesse d'agitation entre 1000 et 1600 tpm. A l'inverse, dans la colonne, l'efficacité de foisonnement ne dépasse 85% que lorsque la vitesse d'agitation atteint 800 tpm, valeur à partir de laquelle l'incorporation de gaz devient totale.

Enfin, l'incorporation totale du gaz devient encore plus difficile à atteindre lorsque la fraction volumique recherchée vaut 50% pour $G/L = 30/30$. Dans le rotor-stator, cette tendance apparaît surtout à forte vitesse d'agitation au delà de 1000 tpm (eff = 68% à 1600 tpm), ce qui confirme ce qui était observé à plus faible fraction volumique de gaz. Dans la colonne de foisonnement, cette tendance est toujours observée à faible vitesse d'agitation comme précédemment, mais aussi cette fois-ci, à forte vitesse d'agitation. En effet, au delà de 800 tpm, on n'arrive plus à incorporer toute la phase gaz et l'efficacité de foisonnement s'effondre à 42% pour 1600 tpm. Ces résultats démontrent le rôle essentiel du dispositif de foisonnement sur l'incorporation de la phase gaz au sein de la phase continue. Les résultats sont illustrés par la Figure 1.

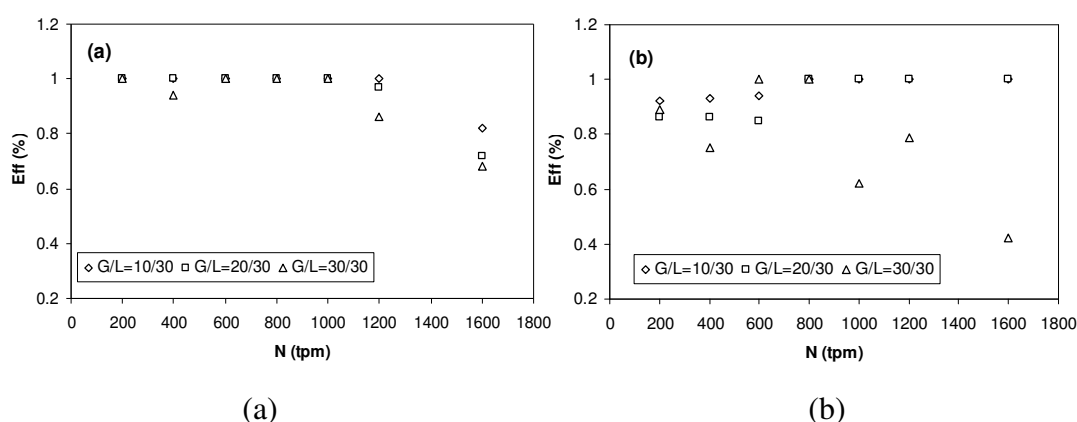


Figure 1. Evolution de l'efficacité de foisonnement en fonction de la vitesse:
(a) dans le rotor-stator; (b) dans la colonne de foisonnement

Effet du dispositif de foisonnement sur la taille et la distribution des bulles

Les résultats expérimentaux sur le diamètre moyen des bulles et la distribution des tailles de bulles montrent d'une manière générale que le diamètre moyen des bulles est plus grand et la distribution des tailles plus large dans le rotor-stator. Toutefois, cette différence sur les tailles dépend de la vitesse d'agitation et a tendance à se réduire lorsque N augmente, en parallèle à la diminution de la taille des bulles, jusqu'à atteindre une taille de bulle minimale. Cette taille critique est semblable dans les deux dispositifs et légèrement inférieure à $20\ \mu\text{m}$. Elle est atteinte en général quand N dépasse 1000 tpm. En ce qui concerne la distribution des tailles de bulles, une distribution monomodale et

homogène est toujours obtenue dans les deux appareils quelle que soit la vitesse d'agitation même à 200 tpm. A cette vitesse, les distributions sont plus larges dans le rotor-stator. Cette tendance se poursuit jusqu'à 1000 tpm, mais au-delà, il n'y a plus de différence significative entre les distributions dans les deux dispositifs. Ces résultats sont illustrés par la Figure 2.

Lorsque la fraction volumique de gaz augmente, les données montrent une fois de plus que le diamètre moyen et la largeur de distribution sont plus grands dans le rotor-stator. Toutefois, cette tendance s'atténue lorsque la fraction volumique de gaz augmente. Ainsi, il faut noter que lorsque ε atteint 50%, il n'y a plus de différence significative entre la taille des bulles quelle que soit la vitesse d'agitation. Il semble donc clair que si le dispositif de foisonnement joue un rôle important sur l'incorporation de gaz, notamment lorsque la fraction de gaz est élevée, ce rôle est moins marqué sur la taille et la distribution des tailles de bulles.

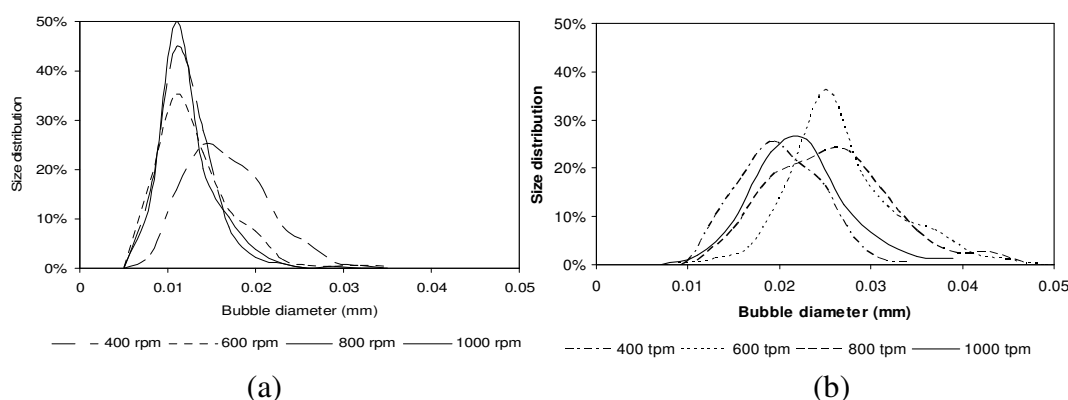


Figure 2. Evolution des distributions de tailles de bulles pour $G/L=10/30$:
(a) dans la colonne de foisonnement; (b) dans le rotor-stator

Influence du dispositif de foisonnement sur la stabilité des mousses

Les résultats sur la stabilité des mousses contenant 25% de gaz sont illustrés par le Tableau 1. L'indice de stabilité vaut 100% pour la mousse au temps initial et il représente, en pourcentage, la hauteur de mousse sur la hauteur totale du récipient. Il diminue au fur et à mesure que le crémage et le drainage forment une couche de liquide désaéré au fond du récipient.

A $G/L = 10/30$, il est clair que la stabilité des mousses n'est pas influencée par le dispositif de foisonnement pour cette fraction volumique de gaz (tableau 1). Ainsi, pour une faible fraction volumique de gaz, même si les diamètres des bulles sont différents, cela n'influence pas significativement la stabilité des mousses. Lorsque $G/L = 20/30$, la stabilité de la mousse diminue de la même manière pour les deux dispositifs, même après 24 heures. L'indice de stabilité de la mousse dans le rotor-stator est voisin de 60% contre 65% dans la colonne au bout de 24 heures. Ces valeurs ne sont pas significativement différentes, même si les mousses obtenues dans le rotor-stator semblent un peu moins stables que celles obtenues dans la colonne. Cette observation est en revanche confirmée lorsque la fraction volumique de gaz passe à 50%. Dans ce cas, l'indice de stabilité des mousses diminue de 100% à 66% dans le rotor-stator alors qu'il diminue de 100% à 80% dans la colonne en 24 heures. Il semble donc que les

mousses obtenues dans le rotor-stator soient moins stables que dans la colonne notamment lorsque la fraction volumique de gaz est importante, même s'il est plus difficile de former une mousse dans la colonne pour un taux de foisonnement de 100%.

Tableau 1. Evolution de l'indice de stabilité des mousses en fonction du temps pour $N = 800$ tpm

Rotor-stator			
Temps (h)	G/L = 10/30	G/L = 20/30	G/L = 30/30
0	100%	100%	100%
4	90%	93%	95%
8	79%	87%	89%
12	68%	80%	83%
16	57%	73%	77%
20	46%	66%	72%
24	36%	59%	66%
Colonne de foisonnement			
Temps (h)	G/L = 10/30	G/L = 20/30	G/L = 30/30
0	100%	100%	100%
4	89%	94%	97%
8	77%	88%	94%
12	66%	82%	90%
16	54%	76%	87%
20	43%	70%	84%
24	31%	64%	81%

Consommation énergétique

Les résultats, reportés sur la Figure 3, montrent que l'énergie transmise au fluide dans le rotor-stator est plus faible que dans la colonne de foisonnement et que l'écart entre les deux appareils devient de plus en plus important lorsque la vitesse d'agitation augmente. Toutefois, cette augmentation reste indépendante de la fraction volumique du gaz, à la précision près des mesures. En revanche, l'énergie totale dissipée (résultats non reportés), incluant les frottements mécaniques, montre des écarts toujours moins importants entre les deux systèmes que pour l'énergie transmise, les frottements mécaniques étant plus élevés dans l'unité rotor-stator. Si les énergies estimées sont similaires pour les deux systèmes à faible vitesse d'agitation, on retrouve à forte vitesse d'agitation le comportement de la Figure 3, avec un rotor-stator qui consomme moins d'énergie que la colonne. Ce comportement s'explique par le temps de séjour, environ trois fois plus long dans la colonne de foisonnement que dans le rotor-stator, qui n'est pas compensé par le cisaillement moyen plus élevé dans le rotor-stator.

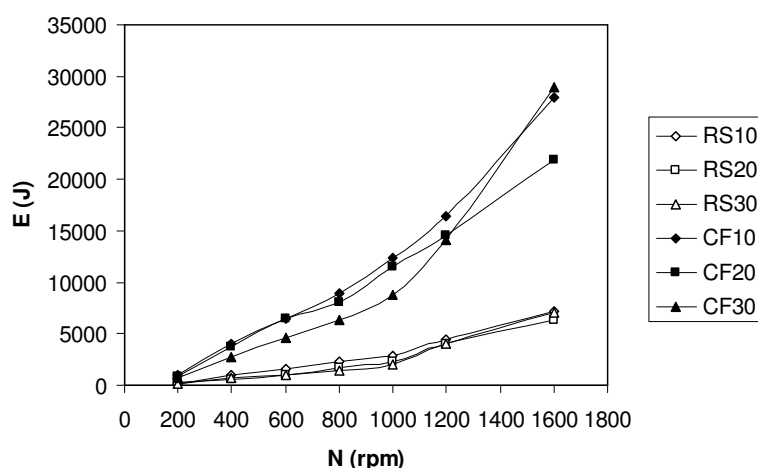


Figure 3. Evolution de l'énergie transmise au fluide dans l'unité rotor-stator (RS) et la colonne de foisonnement (CF) pour les trois débits de gaz (10, 20 et 30 mL.min⁻¹)

Analyse dimensionnelle

Les résultats montrent que la taille des bulles en sortie pouvait être corrélée à la viscosité de procédé (μ) grâce au nombre adimensionnel de Weber (équation 8). En effet, ce nombre est constant dans la colonne, en accord avec les travaux précédents [12, 14], indépendamment des conditions opératoires (débits, N) et de la viscosité de procédé, vers 0,3. La Figure 4 démontre que ce résultat se généralise à l'unité rotor-stator.

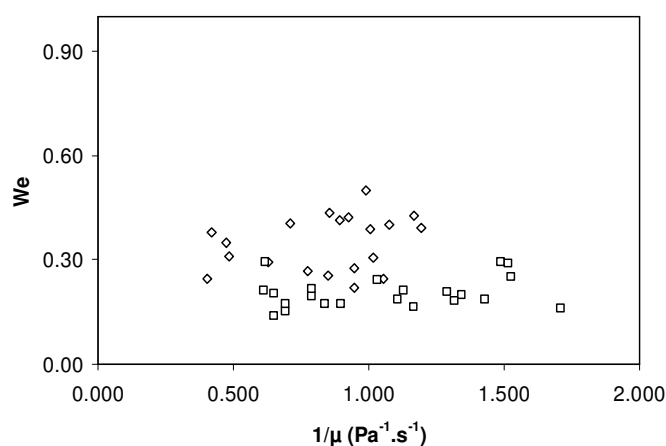


Figure 4. Evolution du nombre de Weber pour l'unité rotor-stator (RS) et la colonne de foisonnement (CF) pour les différents débits et vitesses d'agitation

CONCLUSION

Les résultats obtenus ont démontré l'influence de la technologie sur l'opération de foisonnement en continu. Pour les conditions opératoires et la formulation utilisées, la dispersion de gaz semble plus facile dans l'unité rotor-stator que dans la colonne de foisonnement, notamment pour les taux de foisonnement importants (100%). Dans ce système, une vitesse d'agitation trop élevée nuit au foisonnement, alors que ce sont plutôt les faibles vitesses qui sont défavorables pour la colonne. En revanche, la colonne permet d'atteindre des tailles de bulles plus faibles, notamment à faible vitesse d'agitation, mais cet avantage disparaît à vitesse plus élevée. Cela provient vraisemblablement du fait que la colonne transmet plus d'énergie au fluide à vitesse d'agitation égale, bien que cela se fasse au prix d'une consommation d'énergie totale plus élevée, et ce malgré une dissipation par frottements mécaniques plus importante dans l'unité rotor-stator. De plus, si les mousses avec un taux de foisonnement de 100% sont plus difficiles à produire dans la colonne, elles présentent une stabilité dans le temps plus élevée. Enfin, l'analyse dimensionnelle fondée sur le nombre de Weber, précédemment utilisée sur la colonne de foisonnement, a été généralisée au rotor-stator. Elle confirme l'existence d'un nombre de Weber critique, indépendant des conditions opératoires et qui est autour de 0,3.

En conséquence, le choix d'une unité de foisonnement et de ses conditions opératoires dépend des propriétés recherchées en termes de taux de foisonnement, de stabilité, ainsi que de taille et de distribution des tailles de bulles. Pour l'instant, seule une comparaison expérimentale semble à même de permettre un tel choix. Dans ce cas, le critère énergétique, souvent, ignoré, peut également être discriminant.

REFERENCES

1. Campbell, G.M., Mougeot, E.: Creation and characterisation of aerated food products, *Trends in Food Science & Technology*, **1999**, 10, 283–296;
2. Campbell, G.M., Webb, C., Pandiella, S.S., Niranjana, K. (Eds.): *Bubbles in Food*, Eagan Press, St. Paul, **1999**.
3. Brooker, B.E., Anderson, M., Andrews, A.T.: The development of structure in whipped cream, *Food Microstructure*, **1986**, 5, 277–285;
4. Van Aken, G.A.: *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **2001**, 190, 333–354;
5. Massey, A.H., Khare, A.S., Niranjana, K.: Air inclusion into a model cake batter using a pressure whisk: development of gas hold-up and bubble size distribution, *Journal of Food Science*, **2001**, 66, 1152–1157;
6. Müller-Fischer, N., Windhab, E.J.: Influence of process parameters on microstructure of food foam whipped in a rotor–stator device within a wide static pressure range, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **2005**, 263, 353–362;
7. Gonzáles Méndez, N.F.: *Mise en oeuvre d'un procédé de foisonnement en continu en échangeurs de chaleur à surface raclée. Elaboration de mousses de viande et de poisson*, PhD Thesis, Aubière (France), Université Blaise Pascal, **1990**.

8. Djelveh, G., Bacati, O., Gros, J.B.: Mechanical aspects of gas dispersion in continuous foaming food processes using scraped surface heat exchangers, *Journal of Food Engineering*, **1994**, 23, 213–223;
9. Djelveh, G., Gros, J.B.: Estimation of physical properties of foamed foods using energy dissipation in scraped surface heat exchangers, *Journal of Food Engineering*, **1995**, 26, 45–55;
10. Karim, A.A., Wai, C.C.: Characteristics of foam prepared from starfruit (*Averrhoa carambola* L.) puree by using methyl cellulose, *Food Hydrocolloids*, **1999**, 13, 203–210;
11. Chang, Y., Hartel, R.W.: Development of air cells in a batch ice cream freezer, *Journal of Food Engineering*, **2002**, 55, 71–78;
12. Thakur, R.K., Vial, Ch., Djelveh, G.: Influence of operating conditions and impeller design on the continuous manufacturing of food foams, *Journal of Food Engineering*, **2003**, 60, 9–20;
13. Vial, Ch., Thakur, R.K., Djelveh, G., Picgirard, L.: Continuous manufacturing of a light-textured foamed fresh cheese by dispersion of a gas phase. I. Influence of process parameters, *Journal of Food Engineering*, **2006**, 77, 1–13;
14. Narchi, I., Nicorescu, I., Vial, Ch., Djelveh, G.: Influence des paramètres procédés et de la formulation sur le foisonnement en continu d'un aliment modèle, *Scientific Study & Research – Chemistry and Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry*, **2006**, VII (3), 675-684.