

THE EXPANSION PROCESS OF FOOD FOAMS

OPERATION DU FOISSONNEMENT

Christophe Vial, Gholamreza Djelveh*

*Clermont Université, ENSCCF, EA 3866, Laboratoire de Génie Chimique
et Biochimique, BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand, France*

*Corresponding author: djelveh@univ-bpclermont.fr

Received: December 3, 2009
Accepted: December 17, 2009

Abstract: Food foams are a subset of foods known under the name of whipped products or aerated products [1, 2]. They are formulated products with qualities such as lightness and flexibility and are mainly consumed as an appetizer or dessert. The foamed products obtained by dispersing a gas into a food matrix (the continuous phase) have experienced a growing development in the course of the 80s and 90s. The aeration process associated with their production operation is called expansion or whipping. The paper presents the key-parameters of the process from the formulation standing point, the process implementation in pilot plants and at industrial scale, the characterization of the finite products, the energy base for the process scale up, and the linkage between formulation, emulsion preparation and expansion. This overview of the continuous expansion operation, allowed us to highlight the fact that there are unit operations still poorly described by process engineering and for which the methods and tools for extrapolation and prediction are still in their infancy.

Keywords: *expansion, whipping, foamed foods, formulation, whipped products, aerated products, expansion ratio*

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION
2. *FORMULATION ET PROCÉDE* : LES DEUX MOTS-CLES DU FOISONNEMENT
 - 2.1. Les paramètres clés du foisonnement vus du côté formulation
 - 2.1.1. *Les interactions entre protéines et émulsifiants*
 - 2.1.2. *Agents texturants*
 - 2.1.3. *Matière grasse*
 - 2.2. Mise en œuvre industrielle du procédé de foisonnement
 - 2.2.1. *Procédés discontinus de battage*
 - 2.2.2. *Procédés continus*
 - 2.3. Appareils pilotes continus de laboratoire
 - 2.3.1. *Colonne de test CF*
 - 2.3.2. *Système rotor-stator (RS)*
 - 2.3.3. *Échangeur à surface raclée (ESR)*
3. CARACTERISATION DES PRODUITS FINIS
 - 3.1. Taux de foisonnement
 - 3.2. Distribution spatiale du gaz
 - 3.3. Texture
 - 3.4. Stabilité dans le temps
4. DESCRIPTION ENERGETIQUE POUR L'EXTRAPOLATION DES FOISONNEURS
5. NOMBRE DE WEBER ET PREDICTION DE LA TAILLE DES BULLES
6. ILLUSTRATION DES COUPLAGES ENTRE FORMULATION, MODE DE PREPARATION DE L'EMULSION ET FOISONNEMENT
7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES
8. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. INTRODUCTION

Les mousses alimentaires constituent un sous-ensemble des aliments connus sous la dénomination de *produit foisonné* ou *produit aéré* [1, 2]. Elles correspondent à des produits formulés ayant de nombreuses qualités, telles que légèreté et souplesse et sont principalement consommées en entrée ou en dessert. On distingue classiquement les mousses « salées » (mousses de foie de volailles, de légumes, de poisson ...), les mousses « sucrées » (mousses au chocolat, de fruit, de yaourt, crème fouettée ...) et des mousses « acides » (à base de yaourt ou de fruits). Les aliments foisonnés sont extrêmement répandus dans les pays occidentaux, le consommateur ignorant bien souvent qu'il est confronté à ce type de produit. Ainsi la crème glacée et les sorbets sont des produits foisonnés qui comportent jusqu'à 50% d'air en volume. A titre d'illustration, on trouvera la liste de quelques aliments foisonnés pris parmi les principaux dans le Tableau 1 qui précise s'il s'agit d'une émulsion et quelle est la quantité typique d'air incorporé. Des données complémentaires peuvent être obtenues dans l'article de Campbell et Mougeot [2].

Tableau 1. Exemples de taux de foisonnement¹ (Φ) classiques de quelques aliments foisonnés courants

Aliment foisonné	Émulsion*	Φ (%)	Aliment foisonné	Émulsion*	Φ (%)
Beurre foisonné	(E/H)	5 - 10	Crème glacée et sorbets	(H/E) sauf sorbets	50 - 120
Biscuiterie (fourrages)	(-)	10 - 30	Fromages à tartiner	(H/E)	5 - 20
Blancs en neige	(-)	400 - 600	Meringue	(-)	700 - 900
Charcuterie (mousses ...)	(H/E)	30 - 40	Mousse de fruits	(-)	30 - 40
Confiserie (marshmallow)	(-)	200 - 300	Mousse de légumes	(H/E)	30 - 40
Crème chantilly et toppings	(H/E)	70 - 200	Pâtisserie (génoise)	(H/E) ou (-)	20 - 40

* précise si la phase continue est une émulsion huile-dans-eau (H/E), eau-dans-huile (E/H) ou n'est pas une émulsion (-).

Les produits foisonnés obtenus par dispersion d'un gaz dans une matrice alimentaire (la « phase continue ») ont connu un développement croissant dans le courant des années 80 et 90. Le procédé d'aération associé à leur production est appelé *opération de foisonnement*. Son succès résulte tout d'abord du fait qu'il est « simple » parce que les combinaisons d'ingrédients possibles dans la phase continue sont innombrables et permettent a priori d'obtenir une infinité d'aspects et de textures, sous réserve de former des produits aérés stables. Il est également peu onéreux parce que l'ingrédient ajouté est le plus souvent l'air. Enfin, l'introduction de gaz dans une matrice alimentaire permet non seulement de diminuer la densité de la matière première, mais également de modifier sa texture, sa couleur et sa tenue en bouche. De plus, elle permet de produire des aliments allégés en calorie, facilement tartinables, fondants en bouche, à l'apparence plus homogène, qui sont caractérisés par une distribution plus uniforme de la saveur. Leurs qualités sensorielles associées à un marketing fondé sur la nouveauté leur ont donc conféré un avantage commercial indéniable par rapport aux produits conventionnels.

2. FORMULATION ET PROCÉDÉ : LES DEUX MOTS-CLES DU FOISONNEMENT

La réussite de l'opération de foisonnement est étroitement associée à la maîtrise de deux familles de critères. La première regroupe les propriétés physicochimiques et donc la formulation de la matrice, tandis que la seconde concerne la technologie utilisée pour la mise en œuvre de l'opération. Tout d'abord, il peut sembler évident que la dispersion d'un gaz dans une phase continue dépende des propriétés de celle-ci, comme par exemple sa viscosité ou plus généralement son comportement rhéologique, mais il faut également y ajouter ses propriétés interfaciales telles que tension de surface, ou encore viscosité et élasticité interfaciales, qui jouent un rôle à la fois sur la formation des bulles

¹ - Le taux de foisonnement est défini plus loin par l'équation 2.

et sur leur stabilisation dans la phase continue, et qui sont moins bien connues. En se plaçant à l'échelle moléculaire, il est clair que quel que soit le mode de dispersion du gaz, celle-ci ne présentera jamais à terme une structure de mousse sans l'intervention d'ingrédients capables dans une premier d'abaisser temps la résistance à la rupture des interfaces gaz-liquide, puis de stabiliser ces mêmes interfaces par la suite. En revanche, une stabilisation trop précoce des interfaces s'opposera aux effets dispersifs d'une action mécanique et bloquera la formation des bulles. On comprendra donc aisément que la nature des ingrédients (protéines, émulsifiant, agents texturants, etc.) qui interviennent dans une formulation alimentaire, ainsi que le mode de la préparation de la matrice (traitements thermomécaniques amont) constituent des paramètres clés qui vont conditionner la mise en œuvre de l'opération de foisonnement. Dans ce qui suit, nous nous bornerons à décrire les points essentiels liés au volet formulation, en considérant le cas déjà complexe d'une matière première émulsionnée. En revanche, nous n'étudierons pas en détail les étapes d'émulsification ainsi que les conditions particulières de foisonnement propres à chaque produit foisonné du Tableau 1 car celles-ci dépassent le cadre de notre analyse qui restera centrée sur les aspects « procédé » de l'opération de foisonnement. Nous nous contenterons donc dans cette section de mentionner les points clés à prendre en compte côté « formulation », avant de décrire plus en détail le volet « procédé ».

2.1. Les paramètres clés du foisonnement vus du côté formulation

Comme nous l'avons indiqué, la réussite de l'opération de foisonnement n'est pas possible sans une formulation adaptée. Pour cette raison, les émulsions destinées au foisonnement ont en général des formulations complexes et contiennent à la fois des agents émulsifiants, moussant et stabilisants. Généralement, elles sont de type huile-dans-eau (H/E) ; la phase dispersée grasse est alors constituée de globules dont la taille maximale est de l'ordre du micromètre. Lors de la préparation d'une émulsion destinée au foisonnement, trois points doivent être considérés avec une attention toute particulière :

2.1.1. Les interactions entre protéines et émulsifiants

Les *agents émulsifiants* (agents tensioactifs de faible poids moléculaire), indispensables pour former une émulsion, sont en général considérés comme de mauvais *agents moussants* lorsqu'il s'agit de former des mousses persistantes, alors qu'ils forment facilement des mousses instables. Leur présence ne favorise donc pas la stabilisation de la mousse à long terme. Du fait de leur taille plus petite que celle des protéines, ils peuvent même se déplacer les protéines des interfaces eau-air et provoquer ainsi la déstabilisation de mousse. En effet, seules les protéines sont considérées comme des agents moussants efficaces pour les formulations alimentaires en terme de stabilité, et parmi elles, ce sont celles de lait et d'œuf (notamment de lactosérum et de blanc d'œuf) qui sont le plus souvent utilisées pour jouer ce rôle [1, 3]. Un excès de protéines est nécessaire, mais pas suffisant, afin de couvrir à la fois les interfaces liquide-liquide et gaz-liquide. Par exemple, il est fréquent de ne pas pouvoir foisonner des matrices dans lesquelles les protéines et les *émulsifiants* sont en compétition forte aux interfaces [4, 5]. Les deux familles d'ingrédients étant indispensables à la formulation, il est donc préférable d'utiliser les émulsifiants liposolubles dans des formulations alimentaires,

par exemple les mono- et diglycérides d'acides gras ou E471, afin de limiter cette compétition, même si cela est contraire à la règle de Bancroft [6,7].

2.1.2. Agents texturants

Comme pour les émulsions, la stabilisation à long terme d'un produit foisonné nécessite l'adjonction d'*agents texturants*. Leur fonction peut être d'augmenter la viscosité (« agent viscosifiant ») ou le caractère élastique (« agent gélifiant ») de la phase continue. En pratique, il s'agit de biopolymères tels que la gélatine, mais aussi de polysaccharides. Pour ces derniers, les concentrations employées doivent être telles que leurs effets déstabilisants (par exemple une incompatibilité thermodynamique avec certaines protéines...) soient masqués par les effets épaississants [1,8]. Leur emploi est cependant limité par les contraintes qualité sur la texture du produit final, voire parfois par la législation selon les pays.

2.1.3. Matière grasse

La matière grasse est connue pour avoir un effet déstabilisant sur le foisonnement lorsqu'elle est présente en faible quantité, par exemple dans les génoises grasses ou la crème allégée fouettée [9]. En revanche, dans les émulsions plus concentrées, elle peut avoir un rôle de stabilisant par *coalescence partielle*. Ce phénomène se traduit par une agglomération de globules gras [9 – 12] qui gardent leur individualité, mais sont liés les uns aux autres par la fusion irréversible de cristaux localisés aux interfaces H/E. De plus, la capacité à stabiliser les bulles de la matière grasse dépend de son état (degré de cristallisation, formes allotropiques...) [13 – 15].

2.2. Mise en œuvre industrielle du procédé de foisonnement

Une conséquence importante de la formulation complexe des matrices alimentaires qui contiennent à la fois des composés solubles, colloïdaux et insolubles en concentrations élevées est le comportement rhéologique complexe, presque toujours rhéofluidifiant, et parfois viscoélastique de ces matrices. Leurs viscosités apparentes dépendront des contraintes mécaniques auxquelles elles sont soumises et pourront donc varier dans l'espace et dans le temps au sein du procédé. Un gradient de vitesse élevé qui diminue la viscosité apparente appliqué pendant un temps de contact long entre les phases gaz et liquide favorisera la migration des agents tensioactifs vers l'interface, mais augmentera aussi la re-coalescence des bulles déjà formées. En revanche, un faible gradient de vitesse contribuera à la stabilisation des interfaces déjà formées, mais ne permettra pas nécessairement de former des bulles de diamètres assez faibles pour assurer la stabilité à long terme du produit foisonné. Ainsi, le choix du dispositif destiné à conduire le foisonnement va influencer les caractéristiques du produit fini, ne serait-ce que par les niveaux des contraintes et des gradients de vitesse qu'il peut appliquer, de même par que le temps de mise en contact qu'il autorise entre les phases. Globalement, il existe deux types de procédés à l'échelle industrielle qui recouvrent trois groupes de technologies ; nous allons maintenant les détailler.

2.2.1. Procédés discontinus de battage

Dans les procédés discontinus par battage, la force motrice du foisonnement est la puissance fournie par l'agitateur. Ils consistent à placer une quantité choisie de phase

continue² dans une cuve de volume donné, puis à la fouetter jusqu'à l'obtention du taux de foisonnement désiré, voire du taux de foisonnement maximal possible si l'agitation est poursuivie assez longtemps. Ils ne permettent pas en général un contrôle précis de la température, ni de la vitesse d'agitation, bien qu'ils disposent pour la plupart de variateurs de vitesse. Le temps est donc le seul moyen de contrôler le taux de foisonnement, ce qui constitue la principale faiblesse de ces équipements : comme l'évolution du volume de gaz incorporé au cours du temps dépend du type de matière première et de sa composition³, ce paramètre doit être ajusté par expérience. Le foisonnement peut être conduit dans un récipient sous pression atmosphérique en injectant du gaz ou en l'aspirant par le ciel, ou bien à sous pression, en général avec injection.

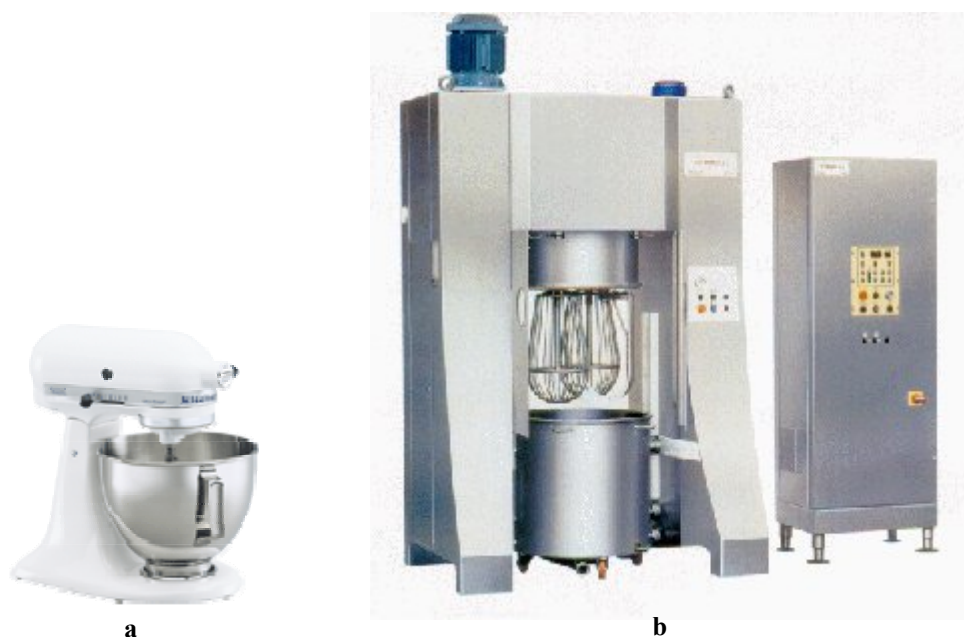


Figure 1. Exemples de systèmes à batteur planétaire de petit volume (a : modèle KitchenAid® KSM150) et industriel (b : Tonelli® T-300).

L'exemple le plus simple est le batteur électrique ménager, le fouet électrique ou le robot-mixer qui peut mettre en œuvre des mobiles axiaux, plusieurs mobiles excentrés ou bien des agitateurs planétaires (Figure 1). Une bonne partie des équipements industriels disponibles sur le marché dérivent de ces systèmes et sont multi-usages : batteur, broyeur, malaxeur, mélangeur, pétrisseur... et accessoirement foisonneur. Nous n'insisterons pas sur le foisonnement en discontinu à cause du fait que les possibilités de contrôler les conditions opératoires du foisonnement sur ces appareils restent très limitées.

2.2.2. Procédés continus

Il existe deux méthodes principales permettant de réaliser l'opération unitaire de foisonnement : la première fait appel à des *systèmes mécaniques rotatifs* qui exercent

² - qui doit tenir compte du taux de foisonnement final si l'on veut éviter les débordements !!

³ - on consultera l'exemple fourni par van Aken (2001) en fonction du taux de matière grasse dans la crème fouettée.

des contraintes sur les interfaces, favorisant la division des bulles par rupture. La force motrice est alors l'énergie mécanique fournie au fluide par l'agitateur, comme en discontinu, excepté que le gaz est systématiquement injecté avec la phase continue. La seconde consiste à disperser le gaz grâce à un système de *mélangeur statique* en utilisant la dissipation énergétique engendrée par un écoulement moyen en translation pour augmenter les interfaces entre les deux phases. Toutefois, les applications industrielles de cette dernière technologie restent pour l'instant cantonnées à des produits très visqueux et faiblement foisonnés (fourrages de biscuits, beurre foisonné...) et nous nous focaliserons donc sur les systèmes rotatifs dans le paragraphe suivant.

Les deux types de dispositifs qui seront détaillés sont donc les échangeurs à surface raclée (ESR) et le système rotor-stator à dents (RS). Les ESR sont en fait des échangeurs de chaleur qui, en dehors du cas particulier de la crème glacée, n'ont trouvé pendant longtemps que peu d'application dans les industries alimentaires. En conséquence, la technologie dominante (hors crème glacée) pour conduire l'opération de foisonnement en continu est le système RS qui, bien que largement utilisé, a rarement fait l'objet d'une étude systématique de ses performances.

Plus en détail, le principe de fonctionnement d'un ESR consiste à faire passer le produit à traiter dans un tube intérieur qui est agité par un rotor axial équipé d'un nombre variable de lames capables de racler la paroi. Le fluide thermique (liquide froid ou chaud, vapeur d'eau, fluide frigorifique tel que ammoniac, propane/propylène ...) circule à co- ou à contre-courant dans l'espace annulaire de la double enveloppe qui entoure le tube intérieur. L'ensemble est souvent entouré par un troisième tube coaxial (triple enveloppe) qui contient un matériau isolant destiné à minimiser les pertes thermiques. Les ESR génèrent des gradients de vitesse très élevés au voisinage de la paroi, jusqu'à 40000 s^{-1} [16], mais également des gradients de vitesse élevés entre les lames et le rotor. La définition d'un gradient de vitesse moyen masque donc d'importantes hétérogénéités spatiales, le gradient moyen en l'absence de lames étant de compris entre 1 et 500 s^{-1} . Le Tableau 2 résume les caractéristiques principales de quelques ESRs commercialisés.

Le deuxième type de dispositif que l'on appelle classiquement « rotor-stator » est un système mécanique rotatif non raclant à faible entrefer, mais en général, cette dénomination est attribuée uniquement aux systèmes équipés de dents dans le cas du foisonnement des aliments. Si les paramètres opératoires du foisonnement sont les mêmes que pour les ESR, les temps de séjour sont en général plus courts, souvent inférieurs à la minute. Cependant, même en l'absence de racleurs, le niveau moyen de cisaillement est en général plus élevé dans un système RS que dans un ESR, ce qui favorise la formation de bulles plus petites dans les unités rotor-stator. En revanche, le contrôle de la température constitue la principale faiblesse de ces unités : bien qu'équipés d'une double-enveloppe, les temps de séjour courts et la géométrie de la tête ne permettent pas un transfert de chaleur efficace. Le Tableau 3 décrit les principaux systèmes commercialisés et résume leurs rares caractéristiques connues.

La rareté des données expérimentales à l'échelle industrielle rend la comparaison de performances difficile entre ces différents dispositifs, notamment pour les systèmes RS qui sont très mal documentés. A cause de la complexité des formulations alimentaires, une validation à l'échelle pilote reste donc une étape indispensable dans le développement d'un produit foisonné. En conséquence, nous nous bornerons par la suite à présenter les caractéristiques d'appareils pilotes continus de laboratoire R&D, mis au

point pour certains au sein notre équipe de recherche⁴ et qui représentent un système RS, un ESR, voire des technologies alternatives intermédiaires et modulables.

Tableau 2. Exemples d'ESR industriels commercialisés

Constructeur	Nom commercial	Surface de transfert (m ²)	Espace annulaire (mm)	Diamètre interne (mm)
Alfa-Laval	Contherm	0,4 - 0,9	11 - 50	152
APV-Invensys	-	0,2 - 0,9	6 - 50	76 - 152
Armstrong Eng. Ass.Inc. / Chemtec BV	Scraped surface crystalliser	0,1 - 10	-	10 - 30
Gerstenberg & Agger - Schröder	Consistator	0,25 - 1,5	19 - 29	98 - 250
	Perfector	0,3 - 0,8	7 - 10	105 - 180
	Kombinator	0,3 - 1,6×10	5 - 15	60 - 336
GMF Goudat / Duprat	Thermorotor	0,1 - 1,6	22 - 50	60 - 260
Lödige	Unitherm	0,1 - 2,3	-	70 - 350
MPEgroup-Terlet	Thermotherm	0,6 - 4,5	50 - 70	500 - 700
Romaco-FrymaKoruma	Frytherm	0,7 - 6,0	-	-
Waukesha Cherry-Burell	Votator (4×120, II, extra heavy duty)	0,3 - 0,9	6 - 50	76 - 152

Tableau 3. Principaux fournisseurs d'unités d'aération rotor-stator

Constructeur	Type rotor	Volume utile (L)	Capacité de traitement estimée (L/h)
Haas-Mondomix BV	dents	1,4 - 9,0	80 - 5000
E.T. Oakes	dents	-	5 - 6400
Trefa Continu Aerating Systems BV	dents	-	25 - 15000
Lipp Mishttechnik GmbH	dents	-*	-

2.3. Appareils pilotes continus de laboratoire

Les trois appareils mis au point au LGCB sont une colonne de foisonnement agitée à faible entrefer modulable et à modules d'agitation non raclants (CF), un système RS et un ESR modulable.

2.3.1. Colonne de test CF

La colonne CF (Figure 2), mise au point au LGCB dans les années 90, est une colonne de test qui n'a pas d'équivalent industriel. Elle est constituée d'un stator (a) tri-étagé avec d'étages de 141 mm de hauteur et de 35 mm de diamètre intérieur pour un volume utile de 380 mL. Elle est munie d'une double enveloppe (i, k) dans laquelle la circulation d'un fluide frigorigène permet de réguler la température à la sortie de la colonne. Les matériels annexes incluent une cuve d'alimentation pressurisée (b, c), l'émulsion à foisonner étant alimentée dans la colonne à l'aide d'une pompe à vis (d). De même, le gaz est introduit en pied de colonne au moyen d'un débitmètre massique (h) à travers un fritté métallique ayant des pores de 20 µm de diamètre moyen (g). La

⁴ - LGCB (Laboratoire de Génie Chimique et Biochimique), Université Blaise Pascal, Aubière, France

dispersion du gaz dans l'émulsion est réalisée par l'agitation mécanique à l'aide d'un axe équipé de trois éléments d'agitation (un par étage) à quatre pales droites (j), de 33 mm de diamètre et de 65 mm de hauteur, qui peuvent être modifiés selon l'application. L'axe est relié à un moteur dont la vitesse de rotation, peut être contrôlée entre 10-1500 tpm et qui couplé à une jauge de contrainte permettant la mesure du couple transmis au fluide (o, p). Des capteurs de pression sont disposés à l'entrée (e) et à la sortie (q) de la colonne afin d'estimer la perte de charge par frottements. La pression opératoire dans la colonne est contrôlée par la compression d'un tuyau polymère souple en sortie (l), ce qui permet de travailler jusqu'à 4 bars relatifs. A la sortie de la colonne, une fraction du produit foisonné peut être dirigée vers un microscope muni d'une caméra dans le but d'effectuer une analyse d'image en ligne de la microstructure de la mousse (m, n).

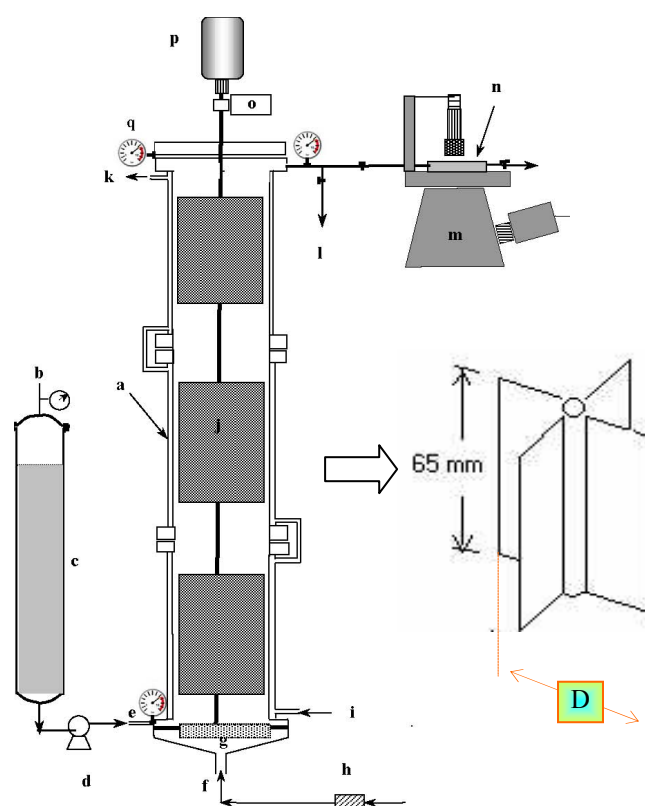


Figure 2. Schéma de la colonne (CF) et de son module d'agitation standard

2.3.2. Système rotor-stator (RS)

Les matériels annexes (moteur, pompe, analyseurs, etc.) dans lesquels est intégré le système RS sont identiques à ceux de la colonne de foisonnement. Seule CF a été remplacée par le système rotor-stator. Comme CF, le stator de RS a un diamètre intérieur de 35 mm, tandis que le diamètre de rotor est de 15 mm (Figure 3) et le volume utile n'est que de 170 mL. Le rotor et le stator sont tous deux équipés de sept rangées de 6 dents à bouts carrés (7,5×4×4 mm). La largeur totale du rotor équipé de dents est donc de 30 mm, ce qui conduit à un entrefer dent-paroi de 2,5 mm. De même, l'entrefer axial entre le rotor et le stator a été fixé à 2,5 mm.

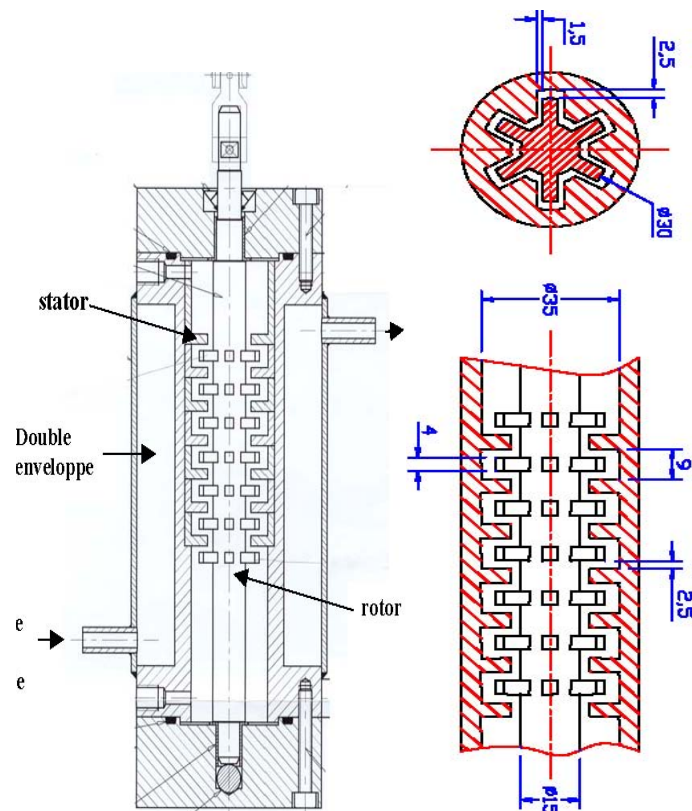


Figure 3. Schéma de principe et coupe détaillée de l'unité rotor-stator RS

2.3.3. Échangeur à surface raclée (ESR)

Le troisième et dernier dispositif mis au point au sein du LGCB (Figure 4a) est un ESR modulable qui peut fonctionner soit en ESR (Figure 4b), soit en extrapolation de CF lorsqu'il est équipé d'agitateurs non raclants. Comme CF, il est constitué de trois étages en série avec double enveloppe qui permettent à la fois d'assurer la dispersion du gaz et de réguler la température de sortie du produit, voire de maintenir indépendamment la température de chaque étage. En standard, il peut être muni de deux lames-racleurs (Figure 4b), mais il peut aussi être équipé par des agitateurs à quatre pales droites similaires à celles de CF (Figure 2). Son volume utile est de 1,25 L.

3. CARACTÉRISATION DES PRODUITS FINIS

D'un point de vue macroscopique, un produit foisonné est principalement caractérisé par quatre paramètres physiques : la fraction volumique occupée par la phase gaz et la distribution spatiale du gaz dans le produit, sa texture et sa stabilité dans le temps.

3.1. Taux de foisonnement

La fraction volumique occupée par le gaz (ε_G), encore appelée *taux de rétention du gaz* ou *taux de vide*, est le rapport du volume occupé par le gaz V_G au volume total V_T de produit foisonné. Toutefois, pour les produits foisonnés alimentaires, on préfère généralement utiliser la notion de *taux de foisonnement* (Φ) ou *overrun* en anglais qui

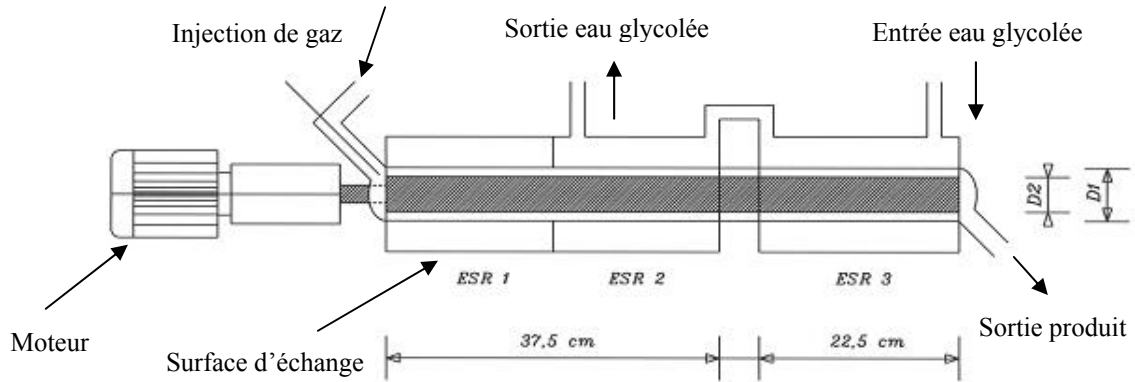


Figure 4a. Échangeur à surface raclée pilote ($D1 = 600 \text{ mm}$; $D2 = 56 \text{ cm}$)

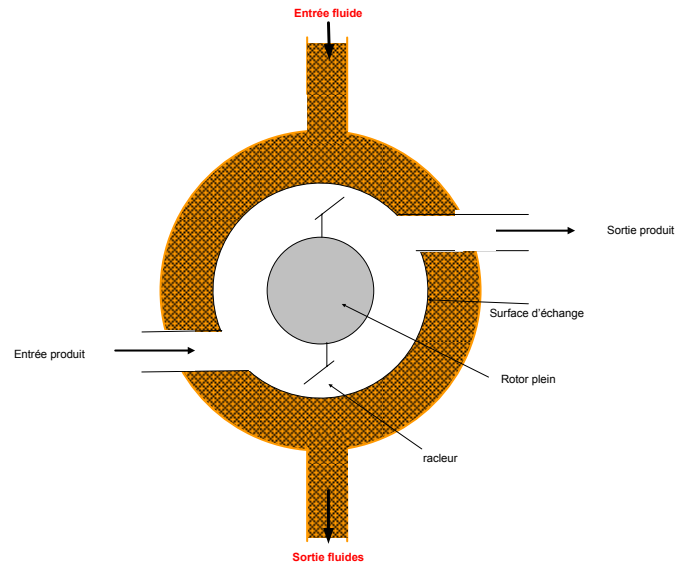


Figure 4b. Coupe transversale d'un échangeur à surface raclée pilote

représente l'expansion de volume due au gaz ramenée sur le volume initial de matière première V_L . On a ainsi :

$$\varepsilon_G = \frac{V_G}{V_L + V_G} = \frac{V_G}{V_T} \quad (1)$$

$$\Phi = \frac{V_G}{V_L} \quad (2)$$

Les deux quantités sont donc équivalentes et sont reliées par les équations suivantes :

$$\varepsilon_G = \frac{\Phi}{1 + \Phi} \text{ et } \Phi = \frac{\varepsilon_G}{1 - \varepsilon_G} \quad (3)$$

3.2. Distribution spatiale du gaz

Même à taux de foisonnement constant, la répartition spatiale du gaz, la distribution de taille des bulles, ainsi que leurs morphologies peuvent être très variables. Ainsi, les bulles les plus petites ($< 100 \mu\text{m}$) sont généralement sphériques dans les mousses humides ($\varepsilon_G < 67\%$), alors que dans les mousses sèches, les bulles sont polyédriques quelle que soit leur taille. Globalement, on utilise le plus souvent deux paramètres :

- la taille moyenne (ou le diamètre moyen dans le cas de bulles sphériques) : le diamètre de Sauter d_{32} (qui correspond au diamètre moyen en surface) est souvent utilisé pour définir la taille moyenne des bulles dans un produit foisonné, mais il est également possible d'utiliser le diamètre moyen en volume d_{43} . Ces derniers s'obtiennent par les équations suivantes dans lesquelles n_i est le nombre de bulles de diamètre d_i .

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i d_i^3}{\sum_{i=1}^n n_i d_i^2}, \quad d_{43} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i d_i^4}{\sum_{i=1}^n n_i d_i^3} \quad (4)$$

- la largeur de la distribution des tailles (proportionnelle à l'écart-type en première approximation dans le cas d'une distribution monomodale).

La taille moyenne influence fortement l'aspect visuel du produit. Par exemple, les bulles doivent être visibles dans le cas de la mousse au chocolat, mais pas dans le cas de la crème glacée ; de même, la largeur de la distribution conditionne l'uniformité d'aspect du produit foisonné, mais elle peut également modifier sa texture.

3.3. Texture

Les mousses sont généralement des produits semi-solides ou solides au repos, mais facilement tranchables et souples en bouche. Leur texture dépend de trois principaux paramètres macroscopiques :

- la texture de la phase continue ;
- le taux de foisonnement ;
- le diamètre des bulles.

Toutefois, la texture d'un produit foisonné dépend également de la façon dont les bulles s'intègrent dans la microstructure de la phase continue et de leur aptitude à :

- former des réseaux entre elles via leurs couches adsorbées (ou membranes) ;
- favoriser la formation de réseaux dans la phase continue qui peuvent mettre en jeu des protéines (par exemple par pontage phosphocalcique pour les caséines du lait), des polysaccharides (par exemple par liaison protéines-polysaccharides lorsqu'ils sont chargés et de charges opposés), voire des globules gras par coalescence partielle [1].

La première situation correspond principalement au cas de mousses sèches, alors que la seconde est la plus fréquemment rencontrée dans le cas des mousses humides. Il est donc difficile de connaître a priori la texture d'un produit foisonné sans une connaissance détaillée de ses ingrédients et de leurs interactions dans la phase continue.

La texture des produits foisonnés est généralement obtenue par des méthodes issues de la rhéologie en cisaillement ou de la pénétrométrie. La pénétrométrie est préférée pour le contrôle-qualité des produits industriels, tandis que la rhéologie en cisaillement est

plus du domaine de la R&D. Cette dernière s'appuie en général sur des mesures en mode harmonique des modules viscoélastiques de stockage G' (module élastique) et de perte G'' (module visqueux) dans le domaine linéaire où la déformation est réversible, i.e. lorsque l'échantillon revient à son état initial son état initial après arrêt de la déformation. Par exemple, pour une émulsion laitière modèle et le produit foisonné correspondant, Thakur [17] ont montré que les domaines de déformation linéaire à une fréquence de 1 Hz se limitent à environ 10% de déformation pour l'émulsion et à 5% pour la mousse ; au-delà, l'échantillon subit une déformation irréversible. Notons également que le rapport G''/G' correspond à la grandeur $\tan \delta$, appelé *tangente de perte*, qui est aussi utilisé comme un indicateur de stabilité de la mousse [18].

3.4. Stabilité dans le temps

La *stabilité dans le temps* des mousses alimentaires est un facteur purement cinétique qui est cependant primordial d'un point de vue industriel et commercial. Elle dépend à la fois de la stabilité de la phase continue (donc de l'émulsion) et de celle de la phase gaz. Il existe de nombreux phénomènes qui peuvent être considérés comme une source de déstabilisation physique : séparation de l'eau par exsudation, séparation de la phase grasse, apparition d'hétérogénéités spatiales, modification de la texture et donc pertes de propriétés organoleptiques... Une autre forme de déstabilisation, d'origine chimique, est liée à la perte des arômes et de certaines qualités nutritionnelles par oxydation des ingrédients. A priori, l'injection d'une phase gaz en présence d'une porosité ouverte ou de poches d'air fermées rend l'aliment plus sensible aux risques d'oxydation, notamment des arômes et de certains acides gras.

Au niveau de la phase gaz, la stabilité dans le temps des produits foisonnés est très variable. Elle dépend fortement de la formulation et notamment de la présence d'agents stabilisants. De plus, les contraintes sur la stabilité dépendent essentiellement des conditions d'utilisation et de consommation des mousses. Dans le cas de produits intermédiaires, comme les blancs en neige ou les pâtes battues, une stabilité dans le temps limitée à quelques heures est nécessaire, par exemple avant une stabilisation par cuisson ; en revanche, les produits finis, tels que les mousses laitières de type « topping », les cakes ou les crèmes glacées requièrent une stabilité comprise entre un mois et une année.

4. DESCRIPTION ÉNERGÉTIQUE POUR L'EXTRAPOLATION DES FOISONNEURS

Un foisonneur, comme tout système mécaniquement agité peut être caractérisé par une courbe de puissance qui relie un nombre adimensionnel de Reynolds, Re , à un nombre de Newton (ou de puissance) noté Ne [19]. D'après les résultats de Labbafi et coll. [20], les systèmes rotor-stator suivent un comportement classique tel que le produit $Re \cdot Ne$ est constant en régime laminaire, alors que Ne est constant et indépendant de Re en régime turbulent. Le mécanisme de la dispersion du gaz change en fonction du régime d'écoulement. En régime laminaire, c'est l'action des forces visqueuses qui provoque la dispersion du gaz, alors qu'en régime turbulent, ce sont les fluctuations de vitesse dues à la turbulence qui favorisent la rupture, la viscosité ne jouant alors qu'un rôle secondaire [21]. Entre les deux régimes, on rencontre une région de transition qui

semble être défavorable au foisonnement [22, 23]. Pour tous les types de foisonneur, il est alors possible de déterminer la courbe $Re - Ne$. Celle-ci est appelée *courbe de puissance* et est valable pour l'ensemble des fluides newtoniens, mais elle peut aussi être généralisée au cas des fluides non-newtoniens suivant une loi puissance. Par exemple, dans le cas du système RS, il est possible d'estimer Ne par la formule suivante à partir des couples mesurés pendant le foisonnement :

$$Ne = \frac{2\pi C}{\rho N^2 D^4 \cdot l \cdot d} \cdot \frac{(\pi \cdot D - m \cdot d)}{m \cdot r} \quad (5)$$

où C (N/m) est le couple mesuré sur l'axe, ρ (kg/m³) la masse volumique de la mousse à la pression de fonctionnement, N (s⁻¹) la vitesse d'agitation, D (m) le diamètre du rotor, l (m) la longueur des dents, d (m) la largeur des dents, m le nombre de dents par rangée et r le nombre de rangées de dents. La difficulté réside dans l'estimation de Re en régime laminaire dans le cas des fluides non-newtoniens. En effet, contrairement au régime turbulent dans lequel la viscosité n'intervient que très peu, la difficulté de l'analyse du foisonnement en régime laminaire résulte du caractère le plus souvent rhéofluidifiant des émulsions à foisonner, auquel s'ajoute le caractère rhéofluidifiant induit par les bulles de gaz dans la mousse. Il s'agit donc dans un premier temps d'étendre la courbe de puissance aux milieux rhéologiquement complexes. Une des simplifications possible est alors de considérer que, dans la zone d'intérêt, la viscosité apparente de la phase continue η_L peut être modélisée par une loi d'Ostwald de Waele, c'est-à-dire une loi puissance à deux paramètres [24]:

$$\eta_L = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (6)$$

où k et n sont des grandeurs appelées respectivement *consistance* et *indice d'écoulement*. L'hypothèse de Metzner et Otto [25] consiste à supposer que le gradient de vitesse moyen dans le foisonneur γ dépend linéairement de la vitesse d'agitation $\gamma = K_S N$ aussi bien pour les fluides newtoniens que pour les fluides d'Ostwald, du moins tant que l'indice d'écoulement reste supérieur à 0,2. Bien que parfois mise en défaut, cette hypothèse semble valable dans les foisonneurs de type RS et CF, [19, 20]. Les méthodes permettant d'estimer la constante de cisaillement K_S et de vérifier son applicabilité aux fluides rhéofluidifiants ont été comparées par Thakur et coll. [19]. L'une des plus rigoureuses est l'*analogie de Couette virtuelle* [26] qui consiste à déterminer une géométrie de Couette virtuelle qui consomme la même puissance que le foisonneur pour un fluide newtonien. Elle revient à utiliser le foisonneur comme un rhéomètre commercial. Une fois K_S déterminée, il est alors possible d'estimer le nombre de Reynolds généralisé Re_g d'un système RS par la relation suivante :

$$Re_g = \frac{\rho_L N^{2-n} D \cdot e}{k \cdot K_S^{n-1}} \cdot \left(71 + 553 \cdot \frac{e}{\sqrt{D \cdot d}} \right)^{-1} \quad (7)$$

Les Figures 5a et 5b issues de cette démarche font classiquement et clairement apparaître une zone laminaire où le produit $Ne \cdot Re$ est constant et égal à K_P , et une asymptote horizontale à fort Re correspondant au régime turbulent pour lequel Ne est indépendant de Re . En régime laminaire, K_P est un nombre adimensionnel appelé *constante de puissance* qui ne dépend que du type d'équipement (type de rotor...) dans le cas de fluides newtoniens.

5. NOMBRE DE WEBER ET PRÉDICTION DE LA TAILLE DES BULLES

Les phénomènes se déroulant à différentes échelles ne s'extrapolent pas nécessairement dans les mêmes proportions. La problématique de la prédiction de la dimension caractéristique de la taille des bulles se pose donc lors de l'extrapolation du foisonneur, indépendamment de celle-ci. Cette prédiction est cependant possible, comme nous allons l'illustrer ci-dessous dans le cas du régime laminaire qui correspond au foisonnement des produits pâteux.

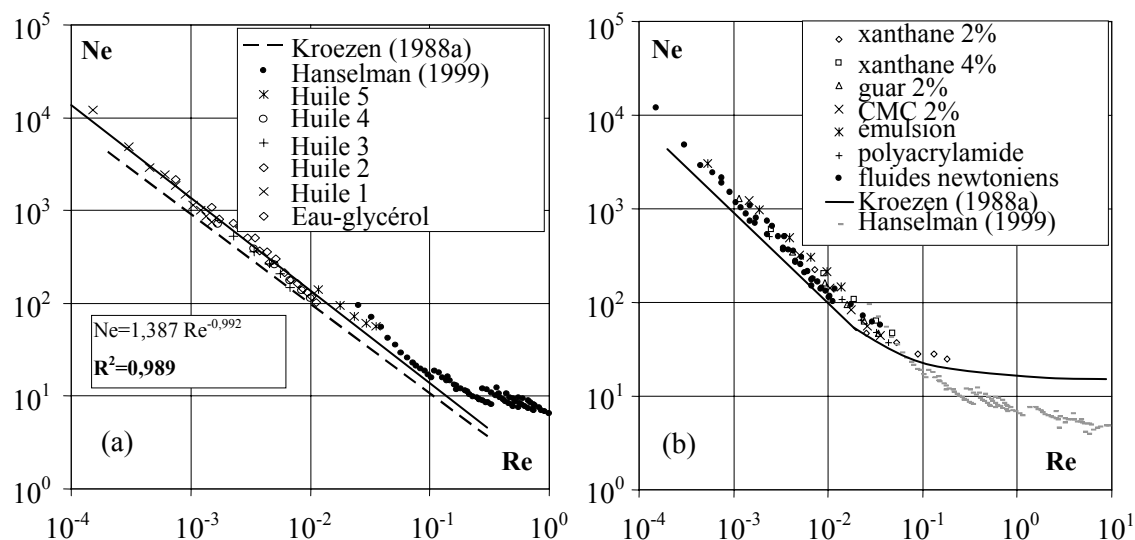


Figure 5. Exemple de courbe Ne versus Re dans le cas d'un foisonneur rotor-stator à dents : (a) pour des fluides newtoniens ; (b) pour des fluides non-newtoniens (adapté de Labbafi et coll., 2005).

En effet, l'analyse du rôle joué par l'agitation mécanique sur la dispersion du gaz à l'échelle microscopique montre que la création des bulles de gaz par rupture aboutit à terme à un équilibre de forces. En régime laminaire, ces forces sont liées d'une part à l'intensité des contraintes mécaniques appliquées et à leur transmission dans la phase liquide par les forces visqueuses, et d'autre part à la résistance de l'interface à la déformation et à la rupture par les forces interfaciales. Le nombre adimensionnel caractéristique est le nombre de Weber laminaire We qui est défini de la façon suivante :

$$We = \frac{\mu \cdot \gamma \cdot d_{32}}{\sigma} \quad (8)$$

Il regroupe l'ensemble des propriétés physico-chimiques majeures de la phase continue (viscosité μ de la dispersion, tension superficielle σ de la phase continue) et le gradient de vitesse moyen appliqué (γ) au diamètre moyen de Sauter des bulles (d_{32}).

L'étude de l'évolution de We en fonction des conditions de procédé et de la formulation va être illustrée par le cas d'une émulsion laitière modèle contenant des protéines de lait (caséinates de sodium et protéines sériques), de la matière grasse laitière et de l'amidon comme agent stabilisant à différents pH [27]. La modification de ce dernier paramètre affecte non seulement le pouvoir moussant des protéines, mais aussi les propriétés rhéologiques de l'émulsion. Les résultats présentés concernent le système CF, mais de similaires ont été obtenus sur le système RS, tous deux décrits dans la section 2.3. La

qualité du produit foisonné obtenu a été caractérisée par son taux de foisonnement et par le diamètre de Sauter des bulles d_{32} . La viscosité apparente moyenne en cours d'opération μ , ainsi que le gradient moyen de vitesse ont été estimés à l'aide de l'analogie de Couette décrite précédemment par l'intermédiaire de la mesure de la puissance dissipée lors du foisonnement, tandis que les caractéristiques rhéologiques de l'émulsion ont été déterminées à l'aide un rhéomètre à contrainte imposée aux fortes et faibles déformations. L'évolution de la taille des bulles en fonction du pH à vitesse d'agitation constante est tout d'abord illustrée par la Figure 6. L'examen de cette figure montre tout d'abord que d_{32} diminue quand le pH augmente, notamment entre 4,6 et 6,6, ce qui est confirmé par le Tableau 4. Cette tendance résulte du fait que les protéines (caséines) perdent partiellement leur fonctionnalité au voisinage de leur point isoélectrique (pH = 4,6), alors que la tension de surface σ varie peu tout en passant par un maximum à pH 4,6 (Tableau 4).

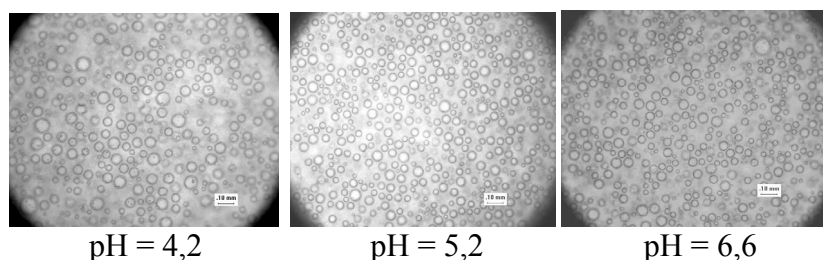


Figure 6. Micrographes illustrant la diminution des tailles de bulles formées à 800 tpm en sortie de foisonneur lors de l'augmentation du pH d'une émulsion laitière modèle

Tableau 4. Évolution de μ , d_{32} et We en fonction du pH et de la vitesse d'agitation obtenus pour l'émulsion laitière modèle avec CF

N (tpm)	pH = 4,2 $\sigma = 0,045 \text{ N.m}^{-1}$			pH = 4,6 $\sigma = 0,049 \text{ N.m}^{-1}$			pH = 6,6 $\sigma = 0,044 \text{ N.m}^{-1}$		
	μ (Pa.s)	d_{32} (μm)	We	μ (Pa.s)	d_{32} (μm)	We	μ (Pa.s)	d_{32} (μm)	We
200	5,5	65	1,4	6,3	54	1,3	5,0	45	0,9
400	3,2	57	1,4	3,4	52	1,4	3,2	44	1,1
600	2,7	53	1,6	2,8	49	1,6	2,6	31	1,0
800	2,4	47	1,7	2,3	43	1,5	2,2	31	1,1

Dans le même temps, le Tableau 4 montre que le nombre de Weber conserve une valeur quasiment indépendante de la vitesse d'agitation à pH constant, mais qui varie un peu en fonction du pH. Finalement, l'équilibre qui s'établit entre les forces visqueuses et la tension superficielle se traduit par une valeur « critique » du nombre de Weber pour une formulation donnée. Cette valeur dépend cependant assez fortement de la physico-chimie de la formulation le pH seul permet de la modifier à composition constante. Cette valeur critique est donc un invariant permettant de prédire la dimension caractéristique des bulles. Les limitations de la méthode sont cependant que cette grandeur critique n'est accessible qu'expérimentalement et qu'elle dépend non seulement de la formulation, mais aussi de la technologie utilisée pour conduire le foisonnement car la valeur de We critique n'est pas identique dans CF et RS.

Globalement, la variabilité de l'invariant en fonction de la formulation et du pH traduit le fait que plusieurs paramètres ne sont pas pris en compte dans le modèle simplifié qui vient d'être présenté : en particulier, l'élasticité de la phase continue dans le cas de matrices viscoélastiques, ainsi que les propriétés dynamiques de l'interface comme la viscosité et l'élasticité interfaciales, sans que l'on sache encore véritablement lesquels de ces paramètres affectent sensiblement la formation et de la stabilisation de la mousse. Ainsi, si l'influence des paramètres clés du procédé, comme le gradient de vitesse qui peut être relié à la vitesse d'agitation et même, via K_S , à la valeur géométrique de l'entrefer pale-paroi est déjà bien prise en compte dans nos modèles, le lien entre la formulation, les phénomènes à l'échelle moléculaire et les propriétés physicochimiques macroscopiques des matrices reste encore à établir.

6. ILLUSTRATION DES COUPLAGES ENTRE FORMULATION, MODE DE PRÉPARATION DE L'ÉMULSION ET FOISSONNEMENT

Pour achever ce chapitre, nous allons illustrer sur un cas concret, la préparation d'un topping de dessert lacté, les couplages entre la formulation de la matrice, son mode de préparation et le choix des technologies de foisonnement. Dans ce « topping » (Tableau 1), il s'agit d'étudier le remplacement de l'agent stabilisant (la gélatine) par un mélange de polysaccharides incluant le xanthane, des carraghénanes et du guar (mélange noté XCG). Les émulsions laitières ont été préparées soit par homogénéisation hautes pressions à 10 MPa (HP), soit à l'aide d'un système membranaire (MB) avec des membranes inorganiques dont le diamètre moyen est soit de 100 nm, soit de 500 nm.

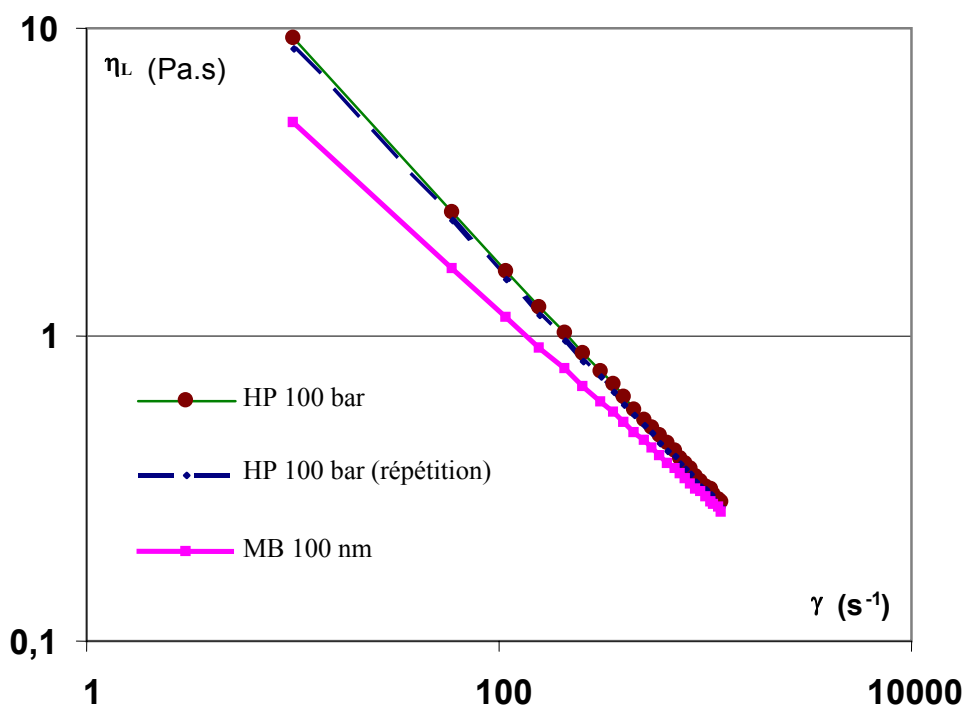


Figure 7. Influence du mode de préparation sur la viscosité η_L de l'émulsion laitière dans le cas de stabilisants de type polysaccharides (HP : homogénéisation hautes pressions ; MB : émulsification par membrane) [28]

Les Figures 7 et 8 présentent l'évolution de la viscosité apparente de l'émulsion en fonction du gradient de vitesse pour les deux types d'agents stabilisants et les deux modes d'émulsification. On constate que, indépendamment de la méthode de préparation et quel que soit le gradient de vitesse appliqué, les viscosités apparentes des émulsions homogénéisées préparées avec le mélange XCG (Figure 7) sont toujours supérieures à celles des émulsions stabilisées par la gélatine (Figure 8). Par ailleurs, les Figures 7 et 8 montrent clairement que la méthode de préparation joue un rôle important sur la rhéologie du produit. En effet, les deux techniques conduisent à des résultats différents pour une même formulation : les émulsions contenant de la gélatine présentent une viscosité supérieure lorsqu'elles sont produites par voie membranaire, alors que l'on observe le résultat opposé lorsque l'on utilise la formulation incluant les polysaccharides. Une constante est en revanche qu'il s'agit toujours de produits fortement rhéofluidifiants, quels que soient le mode de préparation et l'agent stabilisant.

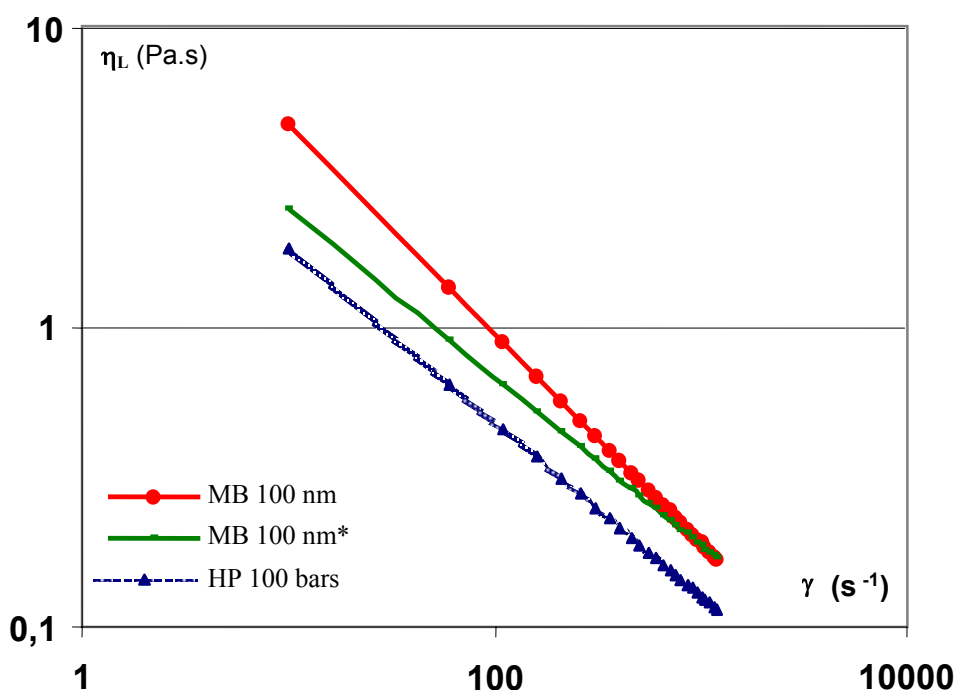


Figure 8. Influence du mode de préparation sur la viscosité η_L de l'émulsion laitière dans le cas d'une stabilisation par la gélatine (HP : homogénéisation hautes pressions ; MB : émulsification par membrane ; *temps de passage divisé par deux) [28]

Dans un premier temps, le foisonnement a été conduit en continu sur l'unité RS décrite dans la section 2.3. L'effet combiné de la rhéologie et des paramètres de procédé a été étudié à l'aide de la courbe de puissance du foisonneur rotor-stator, obtenue préalablement au moyen de fluides modèles (courbe continue sur la Figure 9). On constate alors que l'émulsion contenant le mélange XCG et celle à base de gélatine formées sur la membrane sont foisonnées en régime laminaire, alors que pour l'émulsion à base de gélatine issue de la membrane 500 nm, seules les vitesses les plus faibles correspondent au régime laminaire, le foisonnement se déroulant essentiellement dans la région de transition. Un résultat similaire serait obtenu pour les émulsions gélatine issues d'une homogénéisation hautes pressions. Cela explique pourquoi les

produits foisonnés obtenus à partir de l'émulsion « membrane 500 nm » présentent des taux de foisonnement plus faibles et qu'ils sont rapidement déstabilisés lors d'une augmentation de la vitesse d'agitation, contrairement aux autres émulsions étudiées. Ce comportement est directement lié au « défaut de viscosité » des émulsions « MB 500 nm », puisque c'est leur trop faible viscosité qui est responsable de la transition de régime. Ces résultats illustrent donc parfaitement la forte sensibilité du foisonnement à la formulation et au mode de préparation des émulsions. La méthode d'extrapolation du foisonneur à partir de la courbe de puissance est confirmée par la Figure 10 qui montre bien le maximum de taux de foisonnement et le d_{32} minimal qui sont obtenus pour Re voisin de 10^{-2} , c'est-à-dire juste avant la transition de régime observée sur la Figure 9. Enfin, la comparaison entre quatre technologies de foisonneurs continus a permis de démontrer qu'il existe des alternatives à la technologie standard, le rotor-stator à dents. Cette étude a mis en jeu, en plus de RS, les foisonneurs CF et ESR décrits dans la section 2.3, avec deux variantes pour l'ESR : le standard avec lames-racleurs et l'extrapolation de CF avec des modules d'agitation à quatre pales. Les résultats sont présentés dans le Tableau 5. Leur analyse montre qu'en général, on peut pratiquement toujours assurer le taux de foisonnement cible de 180% sur le système RS. C'est également le cas pour l'ESR standard, ce qui place cette technologie, habituellement réservée aux crèmes glacées, comme une alternative possible.

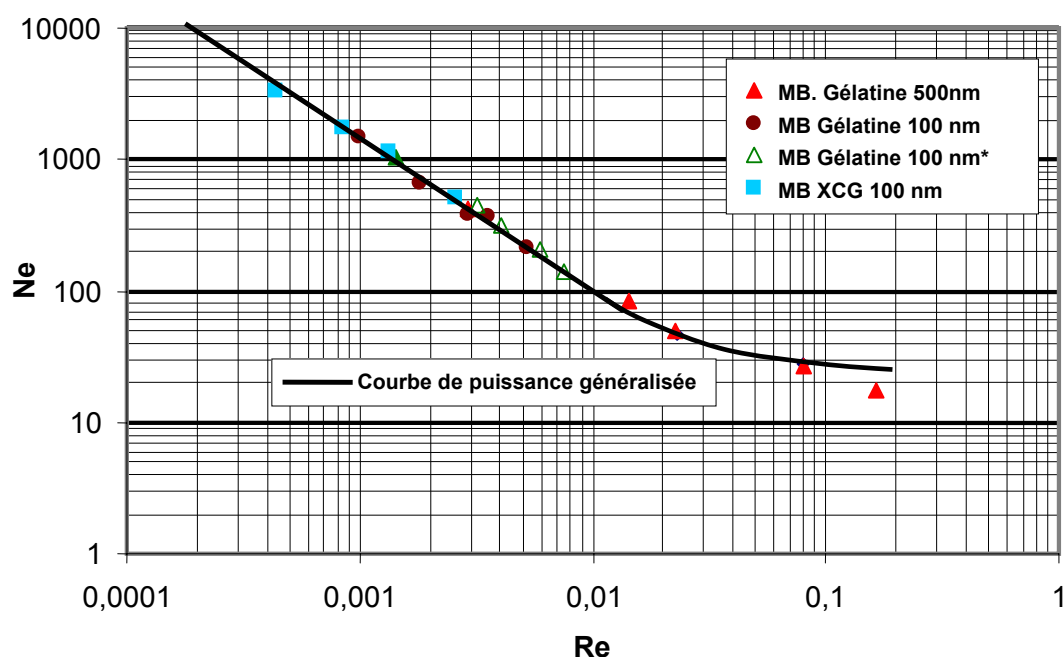


Figure 9. Comparaison entre la courbe de puissance de l'unité RS obtenue avec des fluides modèles et les valeurs estimées du couple $Re-Ne$ en cours de foisonnement pour l'émulsion laitière modèle [28]

Du point de vue de la texture, on constate cependant dans le Tableau 5 que le module d'élasticité de la mousse formée augmente avec la vitesse d'agitation, probablement en raison de la coalescence partielle des globules gras qui est favorisée par des contraintes mécaniques élevées. Pour les deux systèmes RS et ESR standard, 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 ; celle-ci est toujours plus faible sur l'ESR, bien que G' soit moins élevé que pour le système RS.

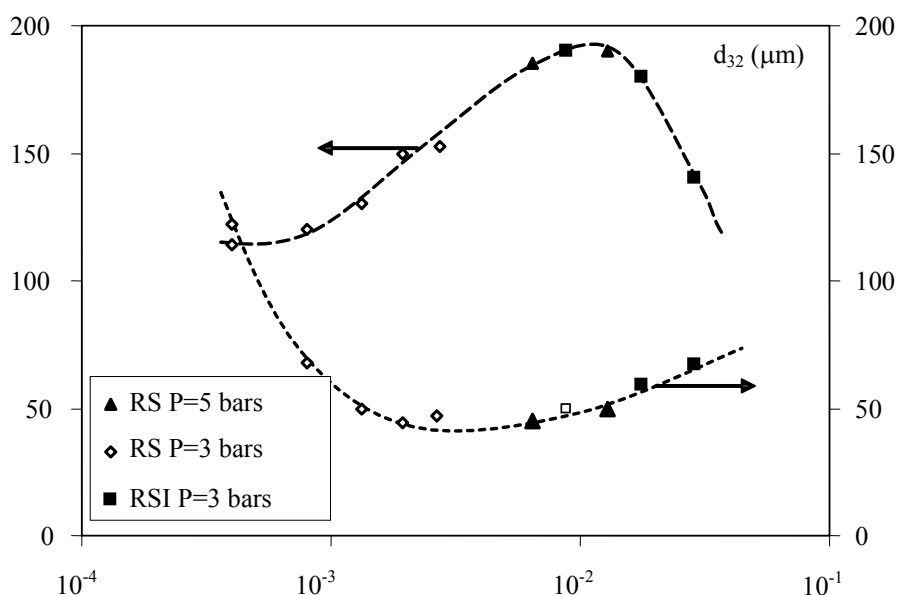


Figure 10. Évolutions du taux de foisonnement Φ (objectif 180%) et du diamètre de Sauter de l'émulsion laitière foisonnée obtenus avec le pilote de laboratoire RS et un appareillage industriel (RSI) en fonction de la pression opératoire P [20]

En revanche, pour CF, on constate une diminution du taux de foisonnement lorsque N augmente avec une mousse beaucoup moins ferme (i.e. G' est plus faible) même lorsque Φ atteint l'objectif fixé (Tableau 5). Le contraire est observé sur l'ESR-4 pales, c'est-à-dire l'extrapolation de CF. Dans les deux cas, les résultats montrent qu'il est beaucoup plus difficile d'assurer le taux de foisonnement de 180% avec ces appareils : ceux-ci présentent des performances beaucoup plus sensibles à la vitesse d'agitation. On peut toutefois se demander s'il n'y a pas dans ce cas un effet de transition de régime dû au changement de taille du foisonneur : le foisonnement serait possible soit à faible vitesse d'agitation dans le foisonneur de petite taille (CF), soit à vitesse d'agitation élevée dans le plus grand (ESR-4 pales). Cette hypothèse est confirmée par le fait qu'il existe un minimum de taux de foisonnement vers 90% en fonction du rapport ND^2 , ce qui nous laisse présager l'existence d'une zone de transition de régime, comme cela a été observé sur le système RS (Figure 9).

En conclusion, il semble que l'échangeur à surface raclée soit une alternative possible au système RS pour foisonner les émulsions laitières de type topping stabilisées par des polysaccharides. Non seulement, le taux de foisonnement est atteint, mais les tailles de bulles sont aussi plus faibles, de l'ordre de 40-50 μm . Le fait que les deux autres foisonneurs aient eu des performances nettement inférieures démontre sans conteste les effets majeurs de la technologie et du procédé sur l'opération foisonnement et le fait que ceux-ci sont encore loin d'avoir été optimisés.

Tableau 5. Comparaison des performances de quatre foisonneurs continus en termes de taux de foisonnement (objectif 180%), module élastique G' , tangente de perte et d_{32} pour l'émulsion laitière stabilisée par des polysaccharides [29]

N (tpm)	RS				CF				ESR standard				ESR 4 pales			
	Φ (%)	G' (Pa)	\tan (δ)	d_{32} (μm)	Φ (%)	G' (Pa)	\tan (δ)	d_{32} (μm)	Φ (%)	G' (Pa)	\tan (δ)	d_{32} (μm)	Φ (%)	G' (Pa)	\tan (δ)	d_{32} (μm)
300									180	750	0,24	39	90	225	0,31	40
400	175	1300	0,23	75	175	900	0,21	66	180	1000	0,25	50				
600	175	1700	0,24	52	175	900	0,22	36	180	1100	0,24	50	160	580	0,25	81
800	175	2300	0,24	77	140	700	0,23	26								
1000	175	2100	0,24	85	110	800	0,23	26								
1200	175	2300	0,25	88	90	800	0,23	*					180	1400	0,24	150

*non mesurable

7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce survol rapide de l'opération de foisonnement en continu, opération mal connue bien qu'utilisée dans de nombreuses industries (alimentaire, mais aussi matériaux pour les plaques de plâtre ou le béton...) nous a permis de mettre en évidence le fait qu'il existe encore des opérations unitaires mal décrites par le Génie des Procédés et pour lesquelles les méthodes et outils d'extrapolation et de prédiction ne sont encore qu'à leur balbutiement. En effet, pour le foisonnement, le rôle exact des propriétés interfaciales autres que la tension de surface est encore mal compris et la façon de les introduire dans les modèles est encore à définir. De plus, si la technologie standard, le rotor-stator à dents est efficace, elle n'est pas toujours optimale et l'utilisation de technologies alternatives est susceptible d'ouvrir la voie vers des produits nouveaux à la fois en termes d'aspect et de texture. Finalement, des résultats récents comparant uniquement les systèmes RS et CF de la section 2.3 montrent clairement que la technologie optimale permettant de conduire le foisonnement varie selon les propriétés de la phase continue, en particulier selon sa rhéologie, et que contrairement à l'approche classique de l'industrie alimentaire qui consiste à varier uniquement la formulation à technologie constante, une démarche tenant compte à la fois des volets procédé et formulation est la voie à suivre dans l'avenir.

8. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Dickinson, E.: *Les Colloïdes Alimentaires*, Éditions Masson, Paris, **1996**;
2. Campbell, G., Mougeot, E.: Creation and characterisation of food products, *Trends Food Sci. Tech.*, **1999**, **10**, 283-296;
3. Mathieu, J.: *Initiation à la Physicochimie du Lait*, Lavoisier, Paris, **1998**;
4. Wilde, P.J.: Interfaces: their role in foam and emulsion behaviour, *Curr. Opinion Coll. Interf. Sci.*, **2000**, **5**, 176-181;
5. Bos, M.A., van Vliet, T.: Interfacial rheological properties of adsorbed protein layers and surfactants, *Adv. Coll. Interf. Sci.*, **2001**, **9**, 437-471;
6. Dickinson, E.: Stability and rheological implications of electrostatic milk protein-polysaccharide interactions, *Trends in Food Sci. Technol.*, **1998**, **9**, 347-357;
7. Pugnali, L.A., Dickinson, E., Ettelaie, R., Mackie, A.R., Wilde, P.J.: Competitive adsorption of proteins and low-molecular-weight surfactants: computer simulation and microscopic imaging, *Adv Coll. Interf. Sci.*, **2004**, **107**, 27-49;
8. Syrbé, A., Bauer, W., Klostermeyer, H.: Polymer science concepts in dairy systems. An overview of milk proteins and food hydrocolloids interaction, *Int. Dairy J.*, **1998**, **8**, 179-193;

9. Van Aken, G.A.: Aeration of emulsions by whipping, *Coll. Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects*, **2001**, **190**, 333-354;
10. Brooker, B.E., Anderson, M., Andrews, A.T.: The development of structure in whipped cream, *Food Microstruct.*, **1986**, **5**, 277-285;
11. Goff, H.D.: Colloidal aspects of ice cream, *Int. Dairy J.*, **1997**, **7**, 363-373;
12. McClements, D.J.: *Food emulsions: Principles, Practice and Techniques*, CRC Press, Boca Raton, **1999**;
13. Pilhofer, G.M., Lee, H.C., McCarthy, M.J., Tong, P.S., German, B.J.: Functionality of milk fat in foam formation and stability, *J. Dairy Sci.*, **1994**, **77**, 55-63;
14. Smith, A.K., Goff, H.D., Kakuda, Y.: Changes in protein and fat structure in whipped cream caused by heat treatment and addition of stabilizer to the cream, *Food Res. Int.*, **2000**, **33**, 697-706;
15. Riaublanc, A., Anton, M., Mariette, F., George, C., Gravier, E., Drelon, N., Omari, A., Leal-Calderon, F.: Impact des cristaux de matière grasse sur l'aptitude au foisonnement et la stabilité des émulsions laitières foisonnées, *Sci. Aliments*, **2005**, **25**, 427-441;
16. Dumont, E., Fayolle, F., Legrand, J.: Flow regimes and wall shear rates determination within a scraped surface heat exchanger, *J. Food Eng.*, **2000**, **45**, 195-207;
17. Thakur, R.K.: *Dispersion de gaz dans les milieux Non-Newtoniens: application au foisonnement des émulsions alimentaires en continu*, Thèse de doctorat de l'Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, **2004**;
18. Thakur, R.K., Vial, Ch., Djelveh, G.: Effect of composition and process parameters on elasticity and solidity of foamed food, *Chem. Eng. Process.*, **2008**, **47**, 474-483;
19. Thakur, R.K., Vial, Ch., Djelveh, G., Labbafi, M.: Mixing of complex fluids with flat-bladed impellers: effect of impeller geometry and highly shear-thinning behaviour, *Chem. Eng. Process.*, **2004**, **43**, 1211-1222;
20. Labbafi, M., Bouaouina, H., Vial, Ch., Djelveh, G., Picgirard, L., Casalinho, J., Schorsch, C.: Impact des technologies et des conditions opératoires du foisonnement sur l'élaboration de mousses laitières de type «topping», *Sci. Aliments*, **2005**, **25**, 381-395;
21. Walstra, P.: *Physical Chemistry of Foods*, Marcel Dekker, Inc., USA, **2003**;
22. Kroezen, A.B.J., Groot Wassink, J.: Bubble size distribution and energy dissipation in foam mixers, *J. Soc. Dyers Colour.*, **1987**, **103**, 386-394;
23. Kroezen, A.B.J., Groot Wassink, J., Bertlein E.: Foam generation in a rotor-stator mixer, *Chem. Eng. Process.*, **1988**, **24**, 145-156;
24. Couarraze, G., Grossiord, J.L.: *Initiation à la Rhéologie* (3^{ème} édition), Lavoisier, Paris, **2000**;
25. Metzner, A.B., Otto, R.: Agitation of non-Newtonian fluids, *AIChE J.*, **1957**, **3**, 3-9;
26. Aït-Kadi, A., Marchal, P., Choplin, L., Chrissemant, A.S., Bousmina, M.: Quantitative analysis of mixer-type rheometers using the Couette analogy, *Can. J. Chem. Eng.*, **2002**, **80**, 1166-1174;
27. Thakur, R.K., Vial, Ch., Djelveh, G.: Effect of pH of food emulsions on their continuous foaming using a mechanically agitated column, *Innovat. Food Sci. Emerg. Tech.*, **2006**, **7**, 203-210;
28. Bouaouina, H., Labbafi, M., Desrumaux, A., Djelveh, G., Valentini, C., Schorsch, C., Bérot, S.: Effet de la formulation sur l'élaboration de mousses laitières de type «topping», *Sci. Aliments*, **2005**, **25**, 367-380;
29. Labbafi, M.: *Effets combinés des paramètres de formulation et de procédé pour la conduite de l'opération de foisonnement en continu d'une émulsion alimentaire*, Thèse de doctorat de l'Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, **2006**.