HAL open science

Typologie de l'écoulement de systèmes diphasiques gaz-liquide à l'intérieur de microcanaux à fort débit d'injection

Julian R. Sepúlveda, Dominique Della Valle, Catherine Loisel, Alain Riaublanc, Agnès Montillet

To cite this version:

Julian R. Sepúlveda, Dominique Della Valle, Catherine Loisel, Alain Riaublanc, Agnès Montillet. Typologie de l'écoulement de systèmes diphasiques gaz-liquide à l'intérieur de microcanaux à fort débit d'injection. Congrès Français de Mécanique, Aug 2019, Brest, France. hal-02360986

HAL Id: hal-02360986

https://hal.science/hal-02360986v1

Submitted on 28 Sep 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Typologie de l'écoulement de systèmes diphasiques gaz-liquide à l'intérieur de microcanaux à fort débit d'injection

J. SEPULVEDA[a], D. DELLAVALLE[b], C. LOISEL[b,c], A. RIAUBLANC[d], A. MONTILLET[a]

a. GEPEA, Université de Nantes, France
b. Oniris, France
c. GEPEA, Oniris, France)
d. BIA, INRA, France

Agnes.Montillet@univ-nantes.fr

Résumé :

Cette étude s'est intéressée à la genèse d'un train de bulles et à son évolution au cours de ses premiers instants au sein d'un système microfluidique. Des solutions de caractères Newtonien et non-Newtonien ont été injectées avec un débit de 11 L h^{-1} ; soit à un débit largement supérieur que ceux classiquement mis en œuvre dans un microcanal. Des solutions modèles Non-Newtoniennes préparées à partir de différentes concentrations de Xanthane et contenant une teneur fixe en protéines sériques ont été testées afin d'appréhender le comportement de formulations contenant des produits biosourcés utilisés dans l'industrie agroalimentaire. Parallèlement, d'autres solutions ont été mises en œuvre afin d'étudier l'influence de différents paramètres comme la viscosité, ou encore de préciser le rôle des molécules biosourcées. L'utilisation d'une caméra rapide a permis de suivre l'évolution de bulles à une vitesse d'environ 20 ms^{-1}. Les différentes typologies d'écoulement observées ont été analysées en fonction du nombre de Reynolds notamment. L'étude s'est également intéressée aux paramètres favorisant la déformation des bulles et aux mécanismes de rupture de celles-ci. La présence de molécules de Xanthane induit clairement une stabilisation des bulles au sein même du microcanal. Un modèle empirique basé sur l'analyse dimensionnelle est enfin proposé afin de prévoir un diamètre équivalent des bulles formé au sein du microcanal.

Abstract:

This study investigated the genesis of a train of bubbles and its evolution during its first moments in a microfluidic system. Newtonian and non-Newtonian solutions were injected at a rate of 11 Lh^{-1}; a much higher rate than those conventionally encountered in classical microfluidic applications. Non-Newtonian model solutions prepared from different concentrations of Xanthan and containing a fixed content of whey proteins were evaluated in order to understand the behavior of formulations containing biosourced products commonly used in the food industry. In parallel, other solutions were tested in order to study the influence of various parameters such as viscosity and to clarify the role of

biosourced molecules. The use of a High-speed camera made it possible to follow the evolution of bubbles at a speed of about 20 ms^{-1}. The different flow typologies observed were analyzed according to the Reynolds number mainly. This study was also interested in the parameters favoring the deformation of the bubbles and the mechanisms of bubble rupture. The presence of Xanthan molecules clearly induces bubble stabilization within the microchannel itself. An empirical model based on dimensional analysis is finally proposed to provide an equivalent diameter of the bubbles formed within the microchannel.

Mots clefs : Microcanaux, Fractionnement gaz-liquide, Mousses, Bulles, Fluide non-Newtonien

1 Introduction

Les mousses sont des systèmes diphasiques composés de bulles dispersées dans une matrice généralement liquide. Ces systèmes développent des structures multiphasiques qui leur confèrent des propriétés d'usage très appréciées dans une ample gamme de produits alimentaires [1]. Ces propriétés d'usage particulières sont le résultat de paramètres structuraux des mousses, notamment la distribution de la taille des bulles et la fraction volumique du gaz incorporé [2][3]. L'interaction entre la formulation et les conditions du procédé a été signalée comme déterminante pour les caractéristiques de la mousse finale obtenue [4][5]. Les procédés de foisonnement comprennent essentiellement la formation continue des bulles par des mécanismes de rupture des interfaces gaz-liquide précédemment formées. Les travaux de Rayleigh [6], Taylor [7] et Grace [8] ont longtemps été les ouvrages de référence dans l'étude de la création d'interfaces liquide-liquide. Bien que développées à l'origine pour le cas des émulsions, leurs conclusions ont été également appliquées au cas des bulles [9].

Les procédés de moussage traditionnels tels que les batteurs (non-continu) ou les systèmes de rotor-stator (continu) ne permettent pas de contrôler le taux d'incorporation d'air et sont pour la plupart énergétiquement coûteux ou entrainent un échauffement du produit. L'utilisation de technologies microfluidiques se révèle être potentiellement une alternative intéressante en raison des multiples avantages tels que l'intensification des opérations de mélange, l'amélioration des transferts thermiques et de masse et des coûts opérationnels et de fabrication moins élevés [10] [11] [12]. En ce qui concerne les systèmes colloïdaux, L'utilisation des dispositifs miniaturisés offre également la possibilité de produire, dans certaines conditions, des bulles et gouttelettes plus monodispersés [13][14].

Cette étude a pour objectif d'étudier un dispositif fonctionnant en continu, basé sur des arrangements de microcanaux, pour produire une application moussante. Pour ceci, une solution non-Newtonienne élaborée à partir de molécules biosourcées est employée comme solution modèle. D'autres solutions de différentes natures rhéologiques sont également évaluées et comparées avec la solution modèle afin d'identifier des effets de la formulation sur la genèse des bulles dans les microcanaux. Par ailleurs, pour être en cohérence avec des applications industrielles du domaine alimentaire, un débit liquide de l'ordre de 10 L·h^{-1} est mis en œuvre. Des techniques de visualisation à haute vitesse ont été utilisées pour figer le mouvement de bulles ayant des temps de formation inferieurs à 0.2 ms, un temps de séjour dans les microcanaux de l'ordre de 1 ms pour des vitesses de glissement allant jusqu'à 20 m·s^{-1}.

2 Méthodologie

2.1 Banc Expérimental

L'étude de la production de mousses en microsystème à haut débit est effectuée dans une installation schématisée dans la figure 1a. La solution contenue dans un bidon de 10 L (1) est amenée jusqu'au dispositif microfluidique grâce à une pompe à trois pistons (2) (Armen Instrument). Parallèlement, le débit d'azote gazeux (3) est contrôlé à l'aide d'un débitmètre massique (4) (EL-FLOW Prestige Bronkhorst). Deux capteurs de pression de gamme 0-10 bar en pression relative (5) (Gems 3100) permettent de relever la pression d'injection du gaz et la pression en sortie du microsystème. Les deux fluides sont mélangés à l'intérieur du dispositif microfluidique (6). La formation des bulles ainsi que le train des bulles à l'intérieur de microcanaux sont visualisés au moyen d'une caméra rapide (7) (HighSpeedStar 6 La Vision). Une lampe halogène (8) est utilisée en rétroéclairage pour obtenir un flux lumineux suffisant permettant de visualiser et figer les bulles aux temps d'exposition très courts nécessaires. L'installation comporte également une cellule de visualisation en sortie du procédé (9) afin d'évaluer la taille des bulles dans les mousses à la fin du procédé. À cet effet, une caméra (CCD XCL-5005 Sony) est employée avec un rétroéclairage de type annulaire (11) (Schott KL 1500).

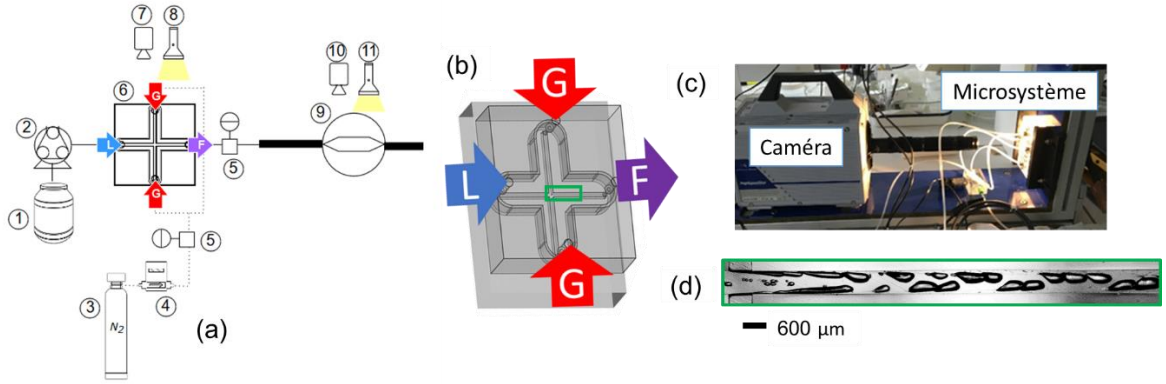


Fig 1. *a) Représentation schématique du dispositif expérimental. b) Géométrie du microsystème utilisé et indication des entrées et sortie des fluides : solution aqueuse (L), N2 (G) et mélange gaz-liquide visualisé dans le canal de sortie (F).*

Le dispositif microfluidique utilisé ainsi que la configuration employée pour l'injection des fluides sont schématisés dans la figure 1b. Le dispositif est constitué de deux plaques en PMMA®. Quatre canaux de section carrée avec un diamètre hydraulique 600 µm forment un motif de croix. Ils sont fraisés sur l'une des plaques. Un joint est introduit dans une gorge entourant les canaux afin d'assurer l'étanchéité. Les deux plaques sont fixées entre elles à l'aide de vis (de type M10) permettant ainsi au dispositif de supporter les pressions élevées, typiquement observées dans les microcanaux aux hauts débits utilisés. Les fluides sont injectés avec une configuration particulière : deux canaux se faisant face permettent l'alimentation en gaz. La solution aqueuse entre dans un canal formant un angle de 90° avec les précédents. La figure 1c montre l'installation utilisée pour la prise d'images dans les canaux ainsi qu'un exemple d'une image typique obtenue (figure 1d).

2.2 Bases liquides

Des solutions de natures rhéologiques différentes ont été préparées puis foisonnées à l'intérieur du dispositif microfluidique. Les solutions modèles non-Newtoniennes ont été élaborées à partir de

molécules biosourcées couramment utilisées dans des applications alimentaires. Ainsi pour ces solutions, des protéines sériques (WPI) ont été utilisées à une concentration fixe de 3% en masse. Les protéines ajoutées jouent le rôle d'agents tensioactifs dans la stabilisation des interfaces créées. De la gomme Xanthane (XG) est également ajoutées à ces solutions modèles, à deux concentrations respectives (0.2 et 0.4%). Le Xanthane est fréquemment employé comme agent épaississant dans diverses formulations alimentaires [15]. Les solutions sont désignées WPI3XG02 et WPI3XG04 selon les concentrations des protéines (3%) et de Xanthane (0.2 et 0.4%). D'autres bases liquides ont été également testées : une solution sans Xanthane, WPI3, contenant seulement des protéines sérique à 3%, une solution ne contenant que du Xanthane à 0,4%, XG04, une solution aqueuse de glycérol à 50% en masse et enfin de l'eau pure (eau déminéralisée). Les solutions à base de protéines, Xanthane ou glycérol sont préparées en utilisant un agitateur RZR 2020 de Heidolph instruments et sont utilisées immédiatement après leur préparation.

2.2 Visualisations à haute vitesse d'écoulement

L'utilisation des microsystèmes transparent PMMA avec des microcanaux de section carrée permet un accès visuel direct à l'écoulement. En conséquence, des informations concernant la typologie de l'écoulement et notamment la taille des microstructures peuvent être collectées [16]. La formation des bulles dans les microcanaux est observée pour cela au moyen d'une caméra rapide. Un ensemble de composants optiques (Navitar) est employé avec la caméra, comprenant notamment un système optique « Precise Eye », un adaptateur 0.67X, un objectif 0.5X et un jeu de tubes d'extension (10, 20 et 40 mm). La vitesse d'obturation utilisée pour figer le mouvement des bulles est de 1 µs. La fréquence d'acquisition d'images est de 5000 i/s. Le temps entre deux images est donc approximativement 0,2 ms.

Dans les écoulements biphasiques divers forces interagissent. Ces interactions définissent le comportement des bulles formées, c'est-à-dire, s'il existe déformation, fractionnement ou stabilisation des interfaces gaz-liquides. Ces rapports des forces sont souvent exprimés par des nombres adimensionnels. Les nombres adimensionnelles relevants pour cette étude sont le nombre de Reynolds et du Capillaire. Dans les écoulements biphasiques, ces nombres sont souvent définis par rapport à la phase qui contribue le plus aux caractéristiques de l'écoulement. En conséquence pour l'écoulement gaz-liquide visualisé à l'intérieur du microcanal de diamètre hydraulique 600 µm ces nombres sont calculés par rapport à la phase liquide comme suit :

$$\mathrm{Ca_L} = \frac{\mu_L U_L}{\sigma} \tag{1}$$

$$\mathrm{Re_L} = \frac{U_L \rho_L D_h}{\mu_L} \tag{2}$$

2.1 Déformation et fractionnement des interfaces

Les images des bulles dans les microcanaux sont récupérées avec le logiciel Photron FASTCAM Viewer. Elles sont par la suite analysées avec un protocole permettant la détermination des dimensions caractéristiques à l'aide du logiciel d'analyse d'images (ImageJ). L'analyse permet d'obtenir les dimensions maximales des bulles dans la direction axiale (L) et radiale (B). Ces dimensions sont utilisées pour calculer le volume de la bulle, V (Equation 3). Ensuite, un diamètre équivalent,

correspondant à une bulle non-déformée, d_{und}, est déterminé à partir d'une sphère ayant le volume calculé précédemment (Equation 4). Les diamètres ainsi obtenus sont alors convertis au diamètre correspondant à la pression atmosphérique, d_0, en utilisant la loi de Boyle (Equation 5). Finalement, un nombre capillaire de la bulle est calculé (Equation 6) et les résultats sont superposés sur la courbe de Grace [8].

$$V = \frac{\pi B^2 L}{4} \tag{3}$$

$$V = \frac{\pi d_{und}^3}{6} \tag{4}$$

$$\frac{d_{und}}{d_0} = \left(\frac{P_0}{P}\right)^{1/3} \tag{5}$$

$$Ca_{bubble} = \frac{\mu_L \dot{\gamma} d_{und}}{2 \sigma} \tag{6}$$

2.1 Modélisation de la taille des bulles dans le canal

Les diamètres obtenus à partir de l'équation 5, d_0, sont utilisés pour la détermination du diamètre de Sauter d_{32} qui est un paramètre pertinent lors de la description de systèmes de particules [17] [18]. Les valeurs des diamètres de Sauter sont utilisés pour modéliser empiriquement la taille des bulles formées dans le microcanal. Le modèle est développé par analyse dimensionnelle d'après la méthode de Vaschy-Buckingham [19].

3 Résultats

3.1 Visualisations

La figure 2 propose une compilation des données recueillies avec les écoulements diphasiques formés dans les microcanaux dans les conditions de débits Q_L=11 L h^{-1} and Q_G=21,6 g h^{-1}. Les conditions expérimentales de ces visualisations sont résumées dans le tableau 1. Des différences nettes sont observées au niveau des trains des bulles formés avec les diverses solutions. De façon générale, les nombres élevés de Reynolds (Re≥950) indiquent la mise en jeu de forces inertielles importantes et l'existence d'un gradient de vitesse élevé en paroi ; lesquels pourraient contribuer à la forme étirée des bulles. Cependant, ceci ne serait pas la seule raison des formes observées. En effet, d'après [20], le rapport de viscosité important existant entre la base liquide et le gaz est un facteur complémentaire qui contribue à la formation de bulles allongées. Le gaz ayant ici une viscosité jusqu'à 10^2 fois inférieure à celle de la base liquide (en considérant la viscosité apparente dans le cas des fluides non-Newtoniens étudiés), les bulles vont donc avoir tendance à prendre des formes allongées.

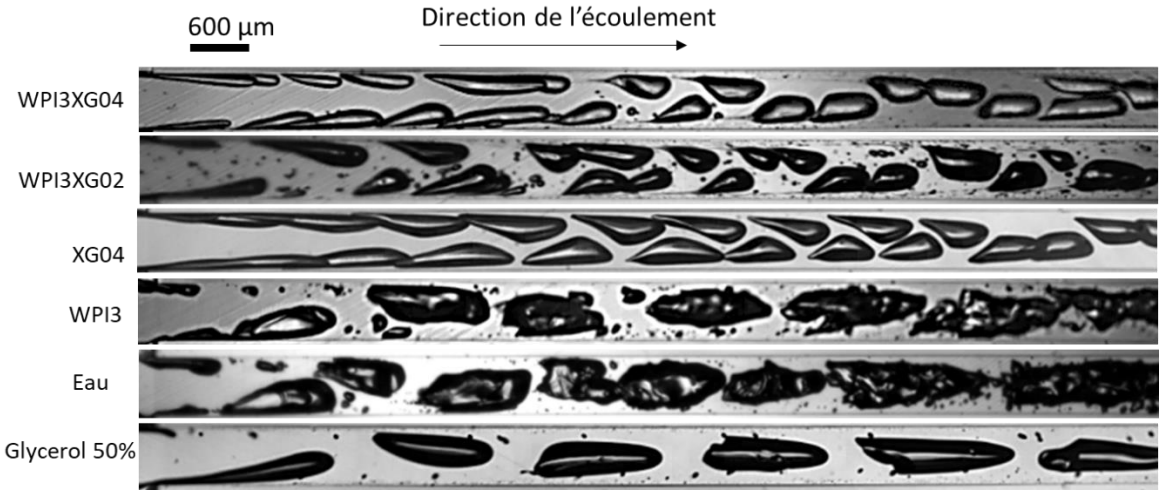


Fig 2. *Trains de bulles observés dans le microcanal de sortie pour les différentes solutions étudiées à Q_L = 11 L h^{-1} et Q_G = 21,6 L h^{-1}. Dans les cas des solutions WPI3XG04 et WPI3XG02, les bulles minuscules observées correspondait à de petits bulles présentes lors de la préparation de ces solutions.*

Table 1. *Paramètres expérimentaux pour des bulles traversant le microcanal à Q_L = 11 L h^{-1} et Q_G = 21.6 L h^{-1}. La viscosité indiquée dans le cas d'une solution non-Newtonienne est la viscosité apparente du fluide en écoulement.*

Solutions	σ	p_{inj}	ΔP	α (p_{inj})	U_G	U_L	U_M	$\dot{\gamma}_{app}$	μ_L	μ_M	Ca_L	Re_L
(-)	(mN.m^{-1})	(bar)	(Pa)	(-)	(m.s^{-1})	(m.s^{-1})	(m s^{-1})	(10^5 s^{-1})	(mPa.s)	(mPa.s)	(-)	(-)
WPI3XG04	46	3.83	153000	0.260	2.97	8.46	11.43	1.36	2.87	4.00	0.53	1721
WPI3XG02	43.7	3.08	134600	0.296	3.56	8.46	12.02	1.43	1.46	2.16	0.28	3351
XG04	72	3.53	158000	0.275	3.21	8.46	11.67	1.38	2.07	2.96	0.24	2462
WPI3	40	3.34	146375	0.282	3.33	8.46	11.79	1.40	1.44	2.08	0.30	3548
Water	72	2.49	145625	0.328	4.13	8.46	12.59	1.49	1.00	1.58	0.12	5076
Glycerol 50%	69	4.60	224667	0.235	2.60	8.46	11.06	1.31	6.00	8.03	0.74	950

Une configuration remarquable est constatée pour les bulles formées au sein des solutions contenant du Xanthane (WPI3XG04, WPI3XG02 et XG04). Ces bulles présentent des formes des larmes. Cette configuration géométrique a été précédemment signalée comme étant caractéristique des bulles traversant des fluides non-Newtoniens [21]. Un examen plus attentif révèle des différences à l'intérieur de ce sous-groupe. Les solutions contenant à la fois du xanthane et des protéines sériques permettent de développer des bulles comportant une queue ou un long filament derrière elles. Ceci évoque un mécanisme de fractionnement parfois observé dans des systèmes diphasiques liquide/liquide ou gaz/liquide et dénommé « transition pointe-jet» ou « Tip-streaming ». Lors de ce phénomène des petites bulles satellites peuvent se détacher progressivement. Ce mécanisme a été décrit, pour des tensioactifs de bas poids moléculaire, comme étant une conséquence des gradients de tension de surface formés à l'interface [22] [23].

Dans la présente étude, les agents tensioactifs utilisés sont des protéines sériques ayant un poids moléculaire de l'ordre de 18,4 kDa. Ce sont des polymères de structure plus complexe qui sont sensibles à des effets électrostatiques (effets d'attraction ou de répulsion en fonction du pH et de la force ionique). Une partie seulement de la molécule de WPI se trouve à l'interface au contact du gaz. La concentration en WPI utilisée (3% massique) assure une concentration en excès [24] de cette molécule par rapport à la surface de bulles créées, ce qui se traduit par une disponibilité immédiate de ces molécules lors de la formation d'interface. Par contre, leur temps d'adsorption par diffusion

pourrait être de quelques millisecondes. Or, du fait des forts débits utilisés, les bulles telles que celles présentées en figure 2 ont des temps de formation inférieur à 0,2 ms et des temps de séjour dans le canal de l'ordre de 1 à 2 ms. Ces échelles de temps extrêmement petites pourraient être à l'origine de formation d'interfaces non saturées à l'avant de la bulle et plus concentrées à l'arrière (pointe de la bulle). Dans ces conditions, l'établissement de zones caractérisées par une tension superficielle plus faible dans les pointes des bulles faciliterait leur fractionnement. Un facteur contribuant au ralentissement de la mobilisation des protéines à l'interface serait la gêne stérique causée par les molécules de Xanthane. D'après [25], les concentrations de Xanthane utilisées dans cette étude (0,2 et 0,4% massique) se trouveraient dans un régime dit « concentré », ce qui signifie que les molécules de Xanthane pourraient s'enchevêtrer gênant ainsi les mouvements des protéines sériques et donc leur adsorption et leur déploiement à l'interface.

Un autre aspect remarquable est constaté quand on compare les cas des solutions WPI3XG02 et WPI3. Ces deux cas exhibent des nombres de Reynolds du même ordre de grandeur et des viscosités liquides apparentes similaires, aux conditions du procédé. Néanmoins, les bulles observées en présence de protéines sériques seules, solution WPI3, présentent des surfaces plus ondulées et irrégulières. Ceci est probablement inhérent aux forces inertielles agissant sur la bulle (Re_L=3550). Cependant, à Re=3350 les bulles de WPI3XG02 ont une forme de larmes ; ceci en dépit de forces inertielles du même ordre de grandeur que pour WPI3. Le caractère très rheofluidifiant des solutions de Xanthane fait que cette solution présente une viscosité dans le procédé comparable à celle de l'eau. Toutefois, le caractère élastique du Xanthane est très probablement à l'origine de cette stabilisation améliorée de l'intégrité des bulles. Cette étude semble montrer que le caractère stabilisateur serait significatif même au moment de formation des bulles dans les microcanaux. Cela pourrait se révéler être une solution intéressante pour favoriser la stabilisation de microstructures lors des applications de productions des mousses et émulsions avec l'utilisation des dispositifs microfluidiques à forts débits.

3.1 Déformation et fractionnement des interfaces

Une discussion basée sur l'utilisation de la courbe de Grace est proposée ici afin d'évaluer son adéquation comme outil pour la description des fractionnements des bulles dans les canaux. Le nombre capillaire de bulle et le rapport de viscosités ont été calculés pour quelques bulles caractéristiques formées dans chaque solution. Les données expérimentales sont superposées sur la courbe de Grace dans la figure 3. Les données sont concentrées autour de la ligne continue au-dessus de laquelle il existe du fractionnement des interfaces dans un écoulement de cisaillement simple. Dans les cas de la solution WPI3 et celui de l'eau pure, la visualisation des bulles montre des déformations de surface pouvant aller jusqu'à l'arrachage de microbulles. Les données obtenues avec la solution WPI3 se trouvent au-dessus de la courbe, ce qui indiquerait qu'effectivement on puisse s'attendre dans ces conditions à un fractionnement des bulles. Par contre, les données obtenues avec l'eau se trouvent au-dessous de la courbe ce qui va, cette fois, à l'encontre des observations expérimentales. Dans le cas du glycérol, aucun signe de fractionnement des bulles n'a été visualisé, du moins dans les premiers instants après la formation de ces bulles, et ce malgré le fait que dans la figure 3 les données pour cette solution indiqueraient un possible fractionnement des interfaces. Concernant les solutions à base de WPI et Xanthane, elles présentent du fractionnement par tip-streaming. Dans les travaux de Grace [8], une limite (représentée en ligne pointillée) a été également établie, au-delà de laquelle le mécanisme de Tip-streaming pourrait se manifester. Il est possible de constater que dans ce cas la courbe semble bien prévoir la présence de ce mécanisme de fractionnement dans nos observations (figure 2).

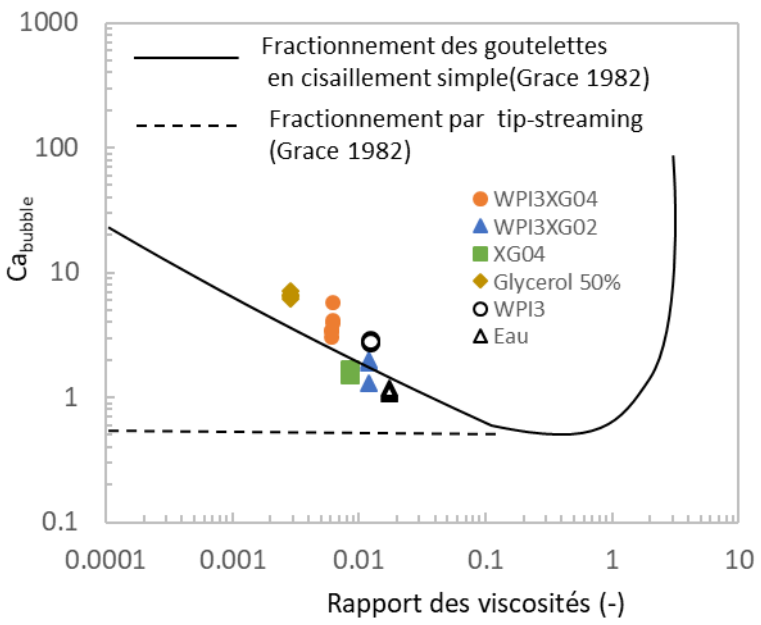


Fig 3. *Présentation des données sur la courbe de Grace pour quelques bulles observées à Q_L = 11 L h^{-1} et Q_G = 21.6 L h^{-1}*

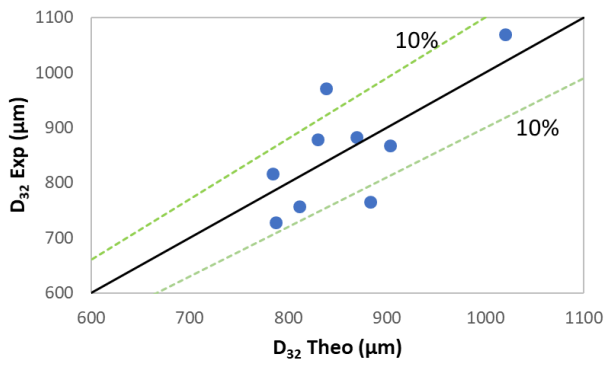
La courbe de Grace est un outil amplement utilisé pour l'étude des mélanges dispersés [26]. Néanmoins, elle a été conçue originalement pour des interfaces liquide-liquide et dans conditions permettant l'élongation très contrôlée des gouttelettes, ce qui ne correspond pas aux conditions d'écoulement constatées dans cette étude. L'utilisation de cette approche constitue néanmoins un point de départ. Il serait souhaitable de conduire des études complémentaires pour la mise au point de courbes similaires dans le cas des systèmes dispersés gaz-liquide conduits dans des conditions plus proches des applications industrielles, à savoir, forts débits et base liquides non-Newtoniennes.

3.1 Modélisation de la taille des bulles dans le canal

Finalement, un modèle empirique (Eqn 5) est proposé pour la prédiction de la taille des bulles formées dans les microcanaux. Ce modèle est établi par analyse dimensionnelle en utilisant des nombres sans dimension basés sur des paramètres caractéristiques comme les viscosités, les débits, les forces interfaciales et inertielles, etc. L'équation (5) permet le calcul du diamètre de Sauter, d_{32}, théorique.

$$\frac{D_{32}}{D_h} = 3.43 \cdot 10^4 \left(\frac{Q_G}{Q_L}\right)^{1.5} \left(\frac{\mu_G}{\mu_L}\right)^{-0.9} {Re_L}^{0.74}\, {Ca_L}^{0.29} \qquad (7)$$

L'erreur relative moyenne, ERM, calculée est de 8.6%, ce qui représente une valeur plutôt acceptable au regard des différentes solutions testées, aux conditions du procédé. La figure 4 présente les valeurs expérimentales calculées en fonction des valeurs prévues par l'équation 7. Des efforts complémentaires sont nécessaires afin d'enrichir les descriptions des tailles de bulles formées dans les microcanaux et améliorer la précision des modèles développés.



(b)

Fig 8. *Modélisation de la taille des bulles formées à l'intérieur des microcanaux à Q_L = 11 L h^{-1} et Q_G = 21.6 L h^{-1}*

4 Conclusions

Cette étude vise à évaluer l'effet des débits élevés sur les interfaces gaz-liquide à l'aide de solutions liquides de natures rhéologiques différentes. Il a montré le rôle particulier des protéines dans l'établissement de gradients interfaciaux conduisant à des mécanismes de rupture des bulles. Une deuxième découverte intéressante est le rôle stabilisant des molécules de Xanthane sur la forme des bulles, dès le moment même de leur formation, malgré les fortes contraintes de cisaillement appliquées dans le canal. Ce travail constitue une première tentative visant à clarifier l'utilisation des microsystèmes dans des conditions de débit plus proches de celles de la production de mousse dans les milieux agro-alimentaires. Elle apporte également une contribution à la compréhension des effets de la formulation sur les caractéristiques des bulles dans les microcanaux à haut débit d'injection des fluides. Cette étude fournit ainsi un aperçu du comportement des bulles et des défis à relever pour envisager l'utilisation de minuscules canaux dans la production réelle de mousses.

5 Remerciements

Ce travail a été réalisé avec le soutien financier du programme régional "Food for Tomorrow - Cap Aliment ; Recherche, Éducation et Innovation en Pays de la Loire", soutenu par la Région française des Pays de la Loire et le Fond européen de développement régional. (FEDER).
Les auteurs remercient tout particulièrement deux membres de l'équipe technique du laboratoire GEPEA, Christophe COUDEL et Jean-Luc HAUSER, pour l'aide apportée lors du développement du banc expérimental.

6 Nomenclature

Nomenclature

B	Dimension maximale radiale d'une bulle
d	Diamètre à la pression P
d_0	Diamètre à pression atmosphérique P_0
d_{32}	Diamètre de Sauter
d_{und}	Diamètre d'une bulle non déformée
D_h	Diamètre hydraulique du microcanal
L	Dimension maximale axiale d'une bulle

P	Pression
P_{inj}	Pression d'injection du gaz
P_0	Pression atmosphérique
Q_G	Débit du gaz
Q_L	Débit du liquide
U_G	Vitesse superficielle du gaz
U_L	Vitesse superficielle du liquide
U_M	Vitesse superficielle de la mousse
V	Volume d'une bulle à la pression P

Dispositif

CX600	Système composé de canaux en forme de croix avec un diamètre hydraulique de 600 µm

Symboles grecques

$\dot{\gamma}_{app}$	Taux de cisaillement apparent
μ_L	Viscosité de la solution dans le procédé
μ_m	Viscosité de la mousse dans le procédé
σ	Tension de surface gaz-liquide
α	Fraction de vide théorique
ρ_L	Masse volumique du liquide
ΔP	Chute de pression

Nombres adimensionnels

Ca_{bubble}	Nombre capillaire d'une bulle
Ca_L	Nombre capillaire du liquide
Re_L	Nombre Reynolds du liquide

Références

[1] Rodríguez Patino, J. M., Carrera Sánchez, C., & Rodríguez Niño, M. R. (2008). Implications of interfacial characteristics of food foaming agents in foam formulations. Advances in Colloid and Interface Science, 140(2), 95–113.

[2] Müller-Fischer, N., &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. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 263(1–3 SPEC. ISS.), 353–362

[3] Drenckhan, W., & Saint-Jalmes, A. (2015). The science of foaming. Advances in Colloid and Interface Science, 222, 228–259.

[4] Stevenson, P. (Ed). 2012. Foam Engineering Fundamentals and Applications. Wiley-Blackwell. UK

[5] Vial, C., Djelveh, G. (2010). The expansion process of food foams operation du foisonnement, Studiişi Cercetări Ştiinţifice, 11, 161–182.

[6] Rayleigh, L. (1879). On the Capillary Phenomena of Jets. Proceedings of the Royal Society of London, 29(196–199), 71–97.

[7] Taylor, G. I. (1934). The Formation of Emulsions in Definable Fields of Flow. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 146(858), 501–523.

[8] Grace†, H. P. (1982). Dispersion phenomena in high viscosity immiscible fluid systems and application of static mixers as dispersion devices in such systems. Chemical Engineering Communications, 14(3–6), 225–277.

[9] Müller-Fischer, N., Tobler, P., Dressler, M., Fischer, P., & Windhab, E. J. (2008). Single bubble deformation and breakup in simple shear flow. Experiments in Fluids, 45(5), 917–926.

[10] Kandlikar, S.G., Garimella, S., Li, D., Colin, S., King, M.R. 2006.Heat transfer and fluid flow in minichannels and microchannels. Elsevier. Oxford, UK

[11] Afzal, A., & Kim, K. Y. (2014). Flow and mixing analysis of non-Newtonian fluids in straight and serpentine microchannels. Chemical Engineering Science, 116, 263–274.
[12] Bandara, T., Nguyen, N.-T., & Rosengarten, G. (2015). Slug flow heat transfer without phase change in microchannels: A review. Chemical Engineering Science, 126, 283–295.
[13] Garstecki, P., Gitlin, I., Diluzio, W., Whitesides, G. M., Kumacheva, E., & Stone, H. A. (2004). Formation of monodisperse bubbles in a microfluidic flow-focusing device. Applied Physics Letters, 85(13), 2649–2651.
[14] Link, D. R., Anna, S. L., Weitz, D. A., & Stone, H. A. (2004). Geometrically Mediated Breakup of Drops in Microfluidic Devices. Physical Review Letters, 92(5), 4.
[15] Challen, I. A. (1994). Xanthan Gum: A Multifunctional Stabiliser for Food Products. In K. Nishinari & E. Doi (Eds.), Food Hydrocolloids (pp. 135–140). Boston, MA: Springer US.
[16] Mohammadi, M., & Sharp, K. V. (2013). Experimental Techniques for Bubble Dynamics Analysis in Microchannels: A Review. Journal of Fluids Engineering, 135(2), 021202.
[17] Aguilera, J. M., & Lillford, P. (Eds.). (2008). Food materials science: principles and practice. New York: Springer.
[18] Kowalczuk, P. B., & Drzymala, J. (2016). Physical meaning of the Sauter mean diameter of spherical particulate matter. Particulate Science and Technology, 34(6), 645–647.
[19] Delaplace, G., Loubière, K., Ducept, F., & Jeantet, R. (2015). Dimensional Analysis of Food Process. San Diego: Elsevier Science & Technology Books. Retrieved from
[20] Hinch, E. J., & Acrivos, A. (1980). Long slender drops in a simple shear flow. Journal of Fluid Mechanics, 98(02), 305.
[21] Tsamopoulos, J., Dimakopoulos, Y., Chatzidai, N., Karapetsas, G., & Pavlidis, M. (2008). Steady bubble rise and deformation in Newtonian and viscoplastic fluids and conditions for bubble entrapment. Journal of Fluid Mechanics, 601.
[22] Anna, S. L. (2016). Droplets and Bubbles in Microfluidic Devices. Annual Review of Fluid Mechanics, 48(1), 285–309
[23] De Bruijn, R. A. (1993). Tip-streaming of drops in simple shear flows. Chemical Engineering Science, 48(2), 277–284.
[24] Puerta-Gomez, A. F. (2014). Characterization of biopolymers for use as matrices for encapsulation of hydrophobic compounds (Thesis). Texas A&M University, Texas, USA
[25] Wyatt, N. B., Gunther, C. M., & Liberatore, M. W. (2011). Increasing viscosity in entangled polyelectrolyte solutions by the addition of salt. Polymer, 52(11), 2437–2444.
[26] Stegeman, Y. W., Van De Vosse, F. N., & Meijer, H. E. H. (2008). On the Applicability of the Grace Curve in Practical Mixing Operations. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 80(4).
[27] Costa, A. L. R., Gomes, A., & Cunha, R. L. (2017). Studies of droplets formation regime and actual flow rate of liquid-liquid flows in flow-focusing microfluidic devices. Experimental Thermal and Fluid Science, 85, 167–175.