

Effet du milieu poreux sur la désorganisation d'un écoulement de Taylor dans un canal millifluidique

Marion Serres^{1,2}, Régis Philippe² & Valérie Vidal¹

¹ Laboratoire de Physique, UMR 5672, CNRS – École normale supérieure de Lyon, Université de Lyon, 46 Allée d'Italie, 69007 Lyon, France

² Laboratoire de Génie des Procédés Catalytiques, UMR 5285 CNRS – CPE Lyon, Université de Lyon, 43 boulevard du 11 novembre 1918, 69100 Villeurbanne, France

valerie.vidal@ens-lyon.fr

Résumé. Nous étudions la désorganisation d'un écoulement gaz-liquide dit « de Taylor » à l'intérieur de deux milieux poreux sensiblement différents : un milieu granulaire polydisperse (diamètre des grains 75–150 μm , porosité 42 %) ou une mousse solide (porosité 96 %). L'écoulement de Taylor (alternance de bulles de gaz et de *slugs* de liquide) est généré à l'aide d'une jonction en T, via l'injection à débit constant de liquide (éthanol, Q_L) et de gaz (azote, Q_G). La variation de rétention liquide apparente, ϵ_L , est mesurée au cours du temps dans différentes zones du canal par visualisation directe (technique de fluorescence). Le contenu fréquentiel de $\epsilon_L(t)$ est analysé en amont et à l'intérieur du milieu poreux. Une analyse qualitative de la valeur moyenne, l'écart-type et la *skewness* du signal montre que l'impact du milieu poreux sur l'écoulement dépend du rapport Q_G/Q_L . Nous mettons en évidence un effet de couplage entre l'écoulement dans le milieu poreux et l'écoulement de Taylor en amont.

Abstract. We investigate the disorganization of a Taylor flow through two different porous media : a granular medium (particle diameter 75–150 μm , porosity 42%) and a solid foam (porosity 96%). The Taylor flow consists of periodic gas bubbles separated by liquid slugs. It is generated by a T-junction on which we inject, at constant flow-rate, liquid (ethanol, Q_L) and gas (nitrogen, Q_G). The apparent liquid holdup variation $\epsilon_L(t)$ is monitored by means of a fluorescence technique in different zones of the channel. The frequency content of the multiphase flow is then analyzed upstream and inside the porous medium. A qualitative analysis of the mean, standard deviation and skewness of $\epsilon_L(t)$ reveals that the impact of the porous medium on the flow depends on the ratio Q_G/Q_L . We evidence a coupling between the flow inside the porous medium and the Taylor flow upstream.

1 Introduction

Les écoulements multiphasiques dans des milieux poreux sont présents dans de nombreux domaines. En géosciences, le développement de nouvelles sources d'énergie (récupération assistée du pétrole, exploitation des hydrates de gaz [1]) ou la compréhension de phénomènes naturels comme la remontée de gaz dans les sédiments marins [2] nécessitent une compréhension fine des écoulements gaz-liquide (G-L) dans différents types de milieux poreux. Cela permettrait, par exemple, d'estimer la quantité de gaz libérée en fonction de la structure des sédiments ou bien la zone d'invasion du gaz entre la source et la surface [3, 4]. D'autres domaines tels que l'industrie chimique sont confrontés à des écoulements similaires. C'est le cas des réactions catalytiques qui font souvent intervenir trois phases, gaz, liquide, solide (G-L-S) avec une phase solide libre (grains dont le mouvement est couplé avec l'écoulement G-L) ou contrainte (milieu poreux rigide) [5]. L'optimisation des transferts et de la réaction elle-même nécessite une compréhension de l'hydrodynamique de l'écoulement G-L-S [6]. Dans ce travail, nous nous intéressons à l'hydrodynamique d'un écoulement G-L, confiné dans un canal millifluidique, à travers un milieu poreux.

2 Dispositif expérimental

2.1 Description

Le dispositif expérimental est constitué d'un canal millimétrique horizontal à section carrée de largeur $h = 2 \text{ mm}$ (section $h \times h = 4 \text{ mm}^2$) et de longueur 24 cm (Fig. 1), creusé dans un bloc de PEEK (polyether

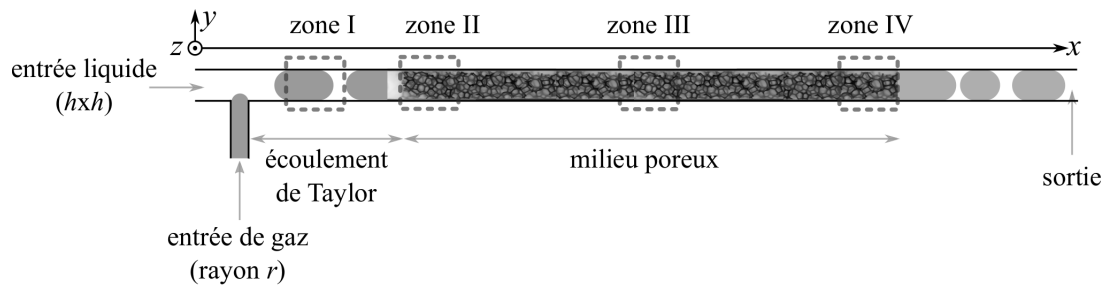


FIGURE 1. Schéma du canal millimétrique. L'écoulement est visualisé à la paroi dans différentes zones, en amont (zone I), à l'entrée (zone II), à l'intérieur (zone III) et en sortie du milieu poreux (zone IV).

ether ketone). L'une des parois est remplacée par une plaque de verre afin de visualiser l'écoulement. Pour garantir les mêmes conditions de mouillabilité, une fine couche (10 nm) de carbone est déposée à l'intérieur du canal. Le liquide (éthanol) est directement injecté dans le canal de section $h \times h$ à débit constant Q_L et le gaz (azote) est injecté à l'aide d'une jonction en T par un capillaire de rayon $r = 0,5$ mm à débit constant Q_G . Les débits de liquide et de gaz varient dans la gamme $Q_L = [0,5-8]$ cm^3/min et $Q_G = [2-35]$ cm^3/min et nous avons exploré une gamme de rapport de débits $Q_G/Q_L = [0,25-35]$. Dans ces conditions, l'écoulement segmenté (auss appelé écoulement de Taylor) généré après la jonction est régulier et les bulles occupent la quasi-totalité de la section du canal [7].

2.2 Milieux poreux

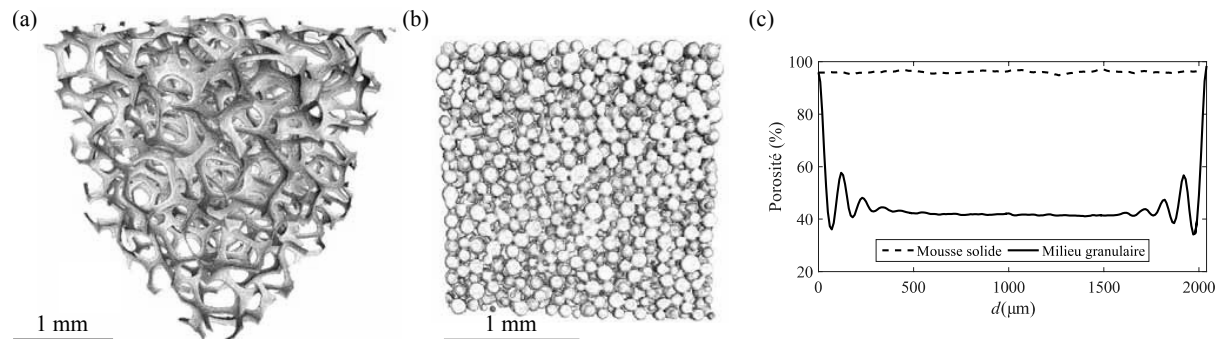


FIGURE 2. Différents milieux poreux utilisés. (a) Mousse solide (carbone 80 PPI, ERG Aerospace) et (b) milieu granulaire (billes de verre) visualisés par tomographie. (c) Porosité de la mousse solide (a) et du lit de billes (b) mesurée par tomographie.

Deux milieux poreux ont été étudiés : une mousse solide à cellules ouvertes (Fig. 2 (a)) et un milieu granulaire polydisperse (Fig. 2 (b)) dont les longueurs à l'intérieur du canal sont respectivement 16 cm et 15 cm. La mousse utilisée est une mousse carbone 80 PPI (Pore Per Inch), ERG Aerospace, et le milieu granulaire est constitué de billes de verre compactées (diamètre moyen des grains 75–150 μm). Afin d'obtenir plus de détails sur leur structure, les deux milieux poreux ont été analysés par tomographie à rayons X (GE Phoenix v|tome|x s, RX tube de 160 kV et point focal pouvant descendre à 1 μm) de précision spatiale 5 μm pour la mousse et 10 μm pour les billes. L'analyse des données est ensuite effectuée grâce au logiciel iMorph® [8] qui fournit des images 3D (Fig. 2 (a) pour la mousse et Fig. 2 (b) pour le milieu granulaire) dont on peut extraire la porosité moyenne et la distribution de diamètre des pores.

Pour la mousse solide, la porosité est constante $\phi = 96 \pm 0,3\%$, sans effet de bord observé (Fig. 2 (c)) et le diamètre moyen des pores est $d_p = 257 \pm 85 \mu\text{m}$. La porosité moyenne du milieu granulaire est $\phi = 44 \pm 2\%$ mais d'importants effets de bord (Fig. 2 (c)), bien connus pour les lits de billes [9], impliquent de considérer une porosité de $\sim 60\%$ pour cette étude basée sur une visualisation à la paroi.

2.3 Analyse d'images

L'écoulement multiphasique est visualisé en temps réel dans quatre zones de l'écoulement (voir Section 2.1 et Fig. 1) : en amont (zone I), à l'entrée (zone II), au centre (zone III) et en sortie (zone IV) du milieu poreux. Un film d'une durée de 15 à 20 s est réalisé dans chaque zone à l'aide d'une caméra (Solinocam H2D2, 113 img/s) montée sur un microscope à fluorescence (Olympus BX51M). Un traceur fluorescent (Rhodamine 6B) est dissous dans le liquide avant son injection, permettant ainsi de distinguer clairement la phase solide (structure fixe), la phase liquide (gris clair) et le gaz (gris foncé) (Figs. 3 (a–d)).

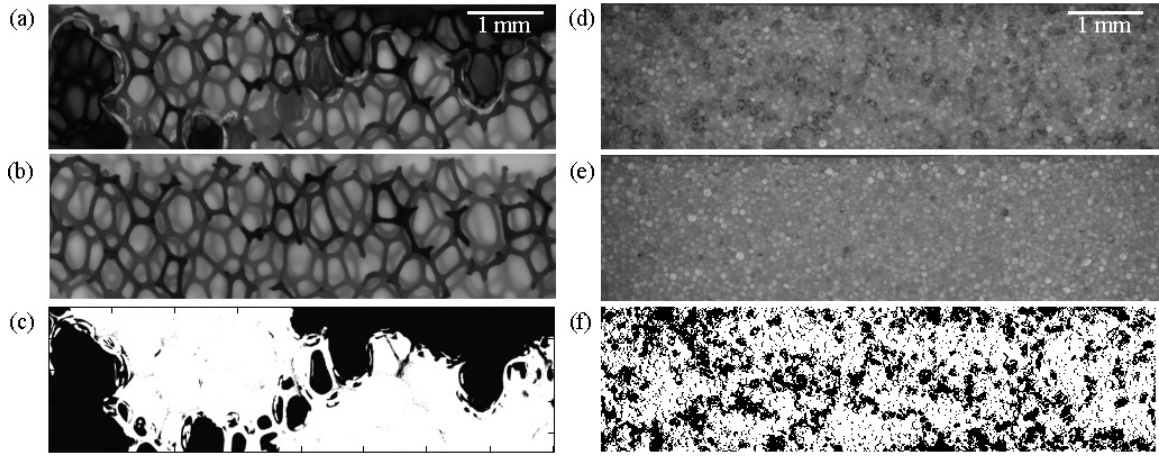


FIGURE 3. Étapes du traitement d'images pour la mousse solide (a–c) et le milieu granulaire (d–f). (a, d) Images brutes. Le traceur fluorescent permet de distinguer la phase liquide (gris clair) de la phase gazeuse (gris foncé). (b, e) Images de référence issues du film de l'écoulement du liquide avec traceur (sans gaz) dans le milieu poreux. (c, f) Images binarisées obtenues après division de l'image brute (a, d) par l'image de référence (b, e) (voir texte).

L'analyse d'images est réalisée avec le logiciel Matlab (Mathworks[®]) afin de quantifier la proportion de liquide dans le milieu, qualifiée ici de *rétenion liquide apparente*, ϵ_L . Dans un premier temps les séquences d'images de chaque film (Figs. 3 (a, d)) sont divisées par l'image de référence obtenue avec un écoulement monophasique liquide dans la même zone (Figs. 3 (b, e)). Un seuil fixé à 0,9 permet ensuite de binariser chaque image (Figs. 3 (c, f)). Une valeur de 1 correspond ainsi aux pixels contenant du liquide ou du solide (billes ou brins de mousse) et une valeur de 0 aux pixels où du gaz a été détecté. La fraction de gaz présente dans le milieu, ϵ_G , est alors estimée en divisant le nombre de pixels à 0 (gaz) par la totalité des pixels de l'image. La rétenion liquide apparente est déduite de cette dernière et de la porosité, $\epsilon_L = \phi - \epsilon_G$. Nous parlons de rétenion liquide *apparente* car elle est estimée à partir d'une visualisation 2D d'un milieu 3D. Selon le milieu poreux utilisé, plusieurs paramètres peuvent être source d'erreur. Pour la mousse solide, la forte porosité (96%) permet une visibilité suffisante pour détecter une bulle de gaz au fond de la cellule ; en revanche, la phase solide est surestimée par la projection, entraînant une sous-estimation de la fraction liquide présente dans le milieu. Dans le cas du milieu granulaire, d'une part il n'y a aucune visibilité sur la profondeur, on ne peut donc pas commenter l'écoulement au coeur de la cellule ; d'autre part, la porosité à la paroi ($\sim 60\%$) étant plus élevée que dans le lit (44%), les phénomènes observés ne sont pas extrapolables sur la globalité de l'écoulement. De fait, l'aspect quantitatif de cette rétenion

liquide apparente n'est pas discuté ni analysé dans cette étude qui se concentre sur l'aspect qualitatif du contenu fréquentiel des *pulses* de liquide induits par l'écoulement de Taylor.

3 Résultats

3.1 Contenu fréquentiel

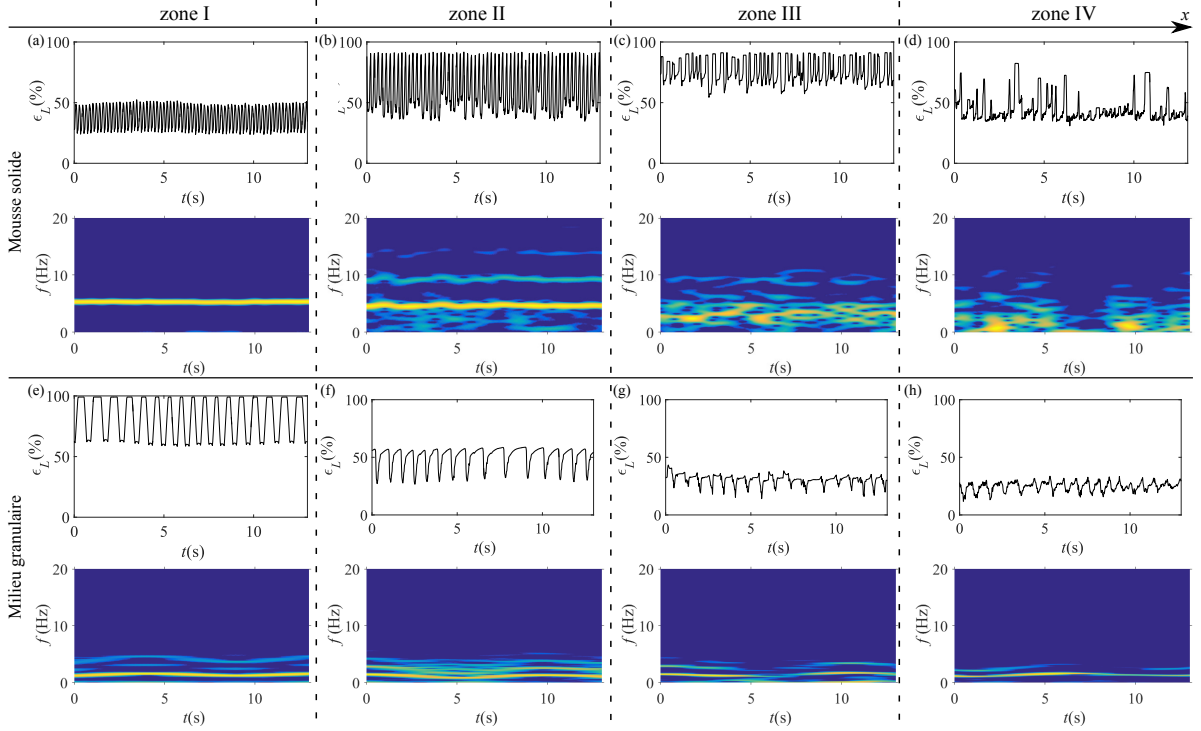


FIGURE 4. Évolution spatio-temporelle de la rétention liquide en amont (zone I) et dans le milieu poreux (zones II à IV) pour la mousse solide (a–d) et le milieu granulaire (e–h). (Haut) Rétention liquide apparente ϵ_L en fonction du temps. (Bas) Diagrammes spatio-temporels du contenu fréquentiel du signal $\epsilon_L(t)$ représenté dans les panneaux supérieurs (fonction densité de probabilité, échelle de couleur [0, 1] du bleu foncé au jaune).

L'évolution temporelle de la rétention liquide apparente ϵ_L est représentée sur la figure 4 pour les deux milieux poreux : la mousse solide (Figs. 4(a–d), haut) et le milieu granulaire (Figs. 4(e–h), haut) à mêmes débits de gaz ($Q_G = 4 \text{ cm}^3/\text{min}$) et de liquide ($Q_L = 4 \text{ cm}^3/\text{min}$) et pour chacune des zones de visualisation (zones I à IV). La périodicité de $\epsilon_L(t)$ dans la zone I reflète le passage des *pulses* de liquide induits par l'écoulement de Taylor en amont du milieu poreux. Pour chacun de ces signaux, un diagramme temps-fréquence est réalisé (spectre normalisé, Figs. 4(a–d) et 4(e–h), bas), permettant de suivre l'évolution spatio-temporelle du contenu fréquentiel du signal.

En amont du milieu poreux (zone I), la fréquence principale de l'écoulement segmenté dans le cas de la mousse solide (Fig. 4(a)) est supérieure à celle dans le milieu granulaire (Fig. 4(e)) malgré des débits de gaz et de liquide identiques. Ce résultat peut sembler surprenant, l'écoulement de Taylor en amont étant a priori fixé par les seuls débits d'injection de gaz et de liquide. Pour l'exemple présenté Fig. 4, la fréquence de Taylor dans un canal identique en l'absence de milieu poreux est proche de 6 Hz. Cela traduit, dans le cas du milieu granulaire, une forte influence de la présence du milieu poreux sur l'écoulement amont. Ce couplage est responsable de la baisse de fréquence observée. Dans le cas de la

mousse solide (Figs. 4 (a–d)), on observe une désorganisation progressive du signal lors de la propagation dans le milieu poreux, jusqu'à retrouver la basse fréquence (~ 1 Hz) présente dès l'amont dans le cas du milieu granulaire. Cette basse fréquence apparaît d'autant plus proche de l'entrée (voire en amont du milieu) que le rapport Q_G/Q_L est grand.

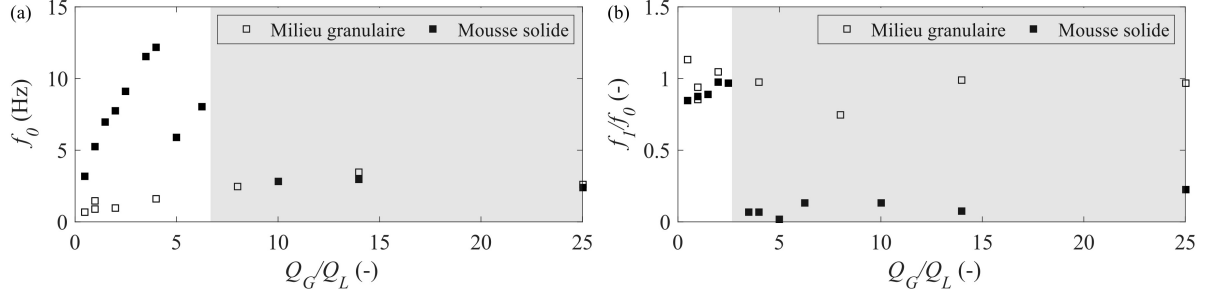


FIGURE 5. (a) Évolution de la fréquence principale f_0 de l'écoulement en amont du milieu poreux (zone I) en fonction du rapport Q_G/Q_L . (b) Fréquence principale f_1 du signal à l'entrée du milieu poreux (zone II), normalisée par la fréquence en amont (\square milieu granulaire ; \blacksquare mousse solide).

La figure 5 (a) montre la fréquence principale f_0 en amont du milieu poreux (zone I) en fonction du rapport Q_G/Q_L . Comme décrit précédemment, les deux milieux poreux se comportent très différemment pour de faibles rapports Q_G/Q_L , le fort couplage entre le milieu granulaire et l'écoulement amont ayant pour conséquence de perturber l'écoulement de Taylor et d'abaisser la fréquence principale. Pour $Q_G/Q_L \gtrsim 6$, on observe un changement de régime hydrodynamique pour la mousse solide, dont la fréquence principale est alors similaire à celle du milieu granulaire. La figure 5 (b) représente l'évolution du rapport de la fréquence à l'entrée du milieu poreux, f_1 (zone II) normalisée par la fréquence de l'écoulement segmenté en amont f_0 . Cette représentation permet de visualiser la désorganisation de l'écoulement lors de sa propagation dans le milieu poreux. Pour la mousse solide, on note un changement de régime clair pour $Q_G/Q_L \simeq 2,5$. Pour de plus grands rapports de débits, l'écoulement segmenté est désorganisé dès l'entrée de l'écoulement. Dans le cas du milieu granulaire, le couplage omniprésent entre les grains et l'écoulement amont fixe une basse fréquence de l'écoulement segmenté, qui est conservée tout au long de la propagation. On n'observe pas, dans ce dernier cas, de désorganisation de l'écoulement au fur et à mesure de sa propagation, bien que l'amplitude et la forme de $\epsilon_L(t)$ changent (voir Figs. 4 (e–h)).

3.2 Valeur moyenne, écart-type et skewness de la rétention liquide

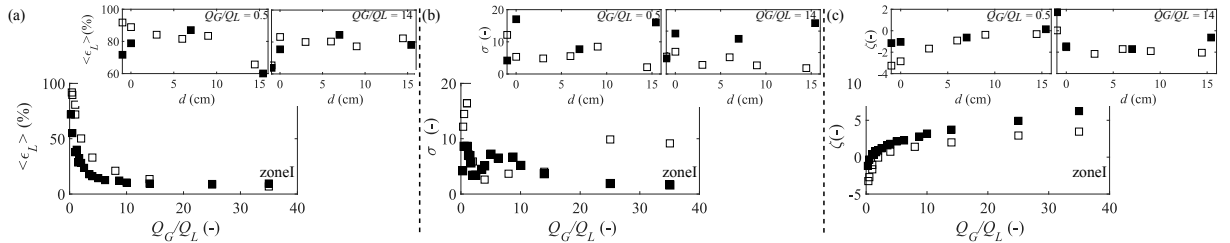


FIGURE 6. Évolution de la valeur moyenne $\langle \epsilon_L \rangle$, l'écart-type σ et *skewness* ζ de la rétention liquide apparente ϵ_L en fonction de Q_G/Q_L (zone I), ou de la distance d dans le milieu poreux (\square milieu granulaire ; \blacksquare mousse solide).

Sur la figure 6 sont rapportées les variations de la valeur moyenne $\langle \epsilon_L \rangle$, l'écart-type σ et la *skewness* ζ des signaux de rétention liquide en fonction du rapport Q_G/Q_L dans la zone I (Figs. 6 (a–c)),

figures principales). L'augmentation de Q_G/Q_L entraîne une diminution continue de la rétention liquide moyenne (Fig. 6(a)) et une augmentation continue de la skewness ζ (Fig. 6(c)). Ces deux tendances peuvent être prédites par simple conservation de la masse dans un écoulement de Taylor classique. L'écart-type σ de la rétention liquide, en revanche, a une forme non triviale avec un maximum à $Q_G/Q_L \simeq 1$ pour les deux milieux poreux, suivi d'un minimum apparent à $Q_G/Q_L \simeq 2,5$ pour la mousse et à $Q_G/Q_L \simeq 4$ pour le milieu granulaire (Fig. 6(b)). Ces variations, qui restent à interpréter, pourraient être liées au couplage entre l'écoulement dans le milieu poreux et l'écoulement segmenté en amont.

Les figures secondaires (panneaux supérieurs) de la figure 6 montrent les variations de $\langle \epsilon_L \rangle$, σ et ζ en fonction de la distance le long du milieu poreux pour deux rapports de débits fixés, $Q_G/Q_L = 0,5$ et $Q_G/Q_L = 14$. Pour $Q_G/Q_L = 0,5$, $\langle \epsilon_L \rangle$ décroît lors de la propagation dans le milieu granulaire et passe par un maximum à $d \simeq 6$ cm pour la mousse, alors qu'elle semble constante dans les deux milieux poreux pour $Q_G/Q_L = 14$ (Fig. 6(a)). La skewness ζ augmente à la fois le long de la mousse et, de manière plus marquée, dans le milieu granulaire pour $Q_G/Q_L = 0,5$, alors qu'elle décroît puis reste environ constante de manière identique dans les deux milieux pour $Q_G/Q_L = 14$ (Fig. 6(c)). Une fois de plus, il est difficile de commenter l'évolution non triviale de σ le long des milieux poreux (Fig. 6(b)).

4 Conclusion

L'hydrodynamique d'un écoulement de Taylor (multiphasique gaz-liquide) traversant un milieu poreux dans un canal millifluidique a été étudiée dans le cas de deux milieux très différents : une mousse solide (porosité 96 %) et un milieu granulaire (porosité $\sim 60\%$ près de la paroi). En l'absence de milieu poreux, ce type d'écoulement est caractérisé par une fréquence bien déterminée, dépendant du rapport de débit gaz-liquide, Q_G/Q_L . Nous avons mis en évidence l'apparition d'un couplage entre le milieu poreux et l'amont, modifiant la fréquence caractéristique de l'écoulement segmenté, qui est abaissée de manière significative dans le cas du milieu granulaire, ou pour des Q_G/Q_L importants dans le cas de la mousse solide. Pour $Q_G/Q_L \lesssim 6$, lorsque ce couplage n'est pas important dans le cas de la mousse solide, on observe une désorganisation progressive de l'écoulement lors de la propagation dans la mousse. La fréquence caractéristique de la rétention liquide apparente s'abaisse ainsi progressivement, jusqu'à rejoindre celle obtenue dans le cas du milieu granulaire. Une étude des propriétés du signal de rétention liquide apparente en fonction de la distance de propagation dans le milieu poreux a montré que l'écart-type était un bon candidat pour espérer quantifier l'effet de ce couplage.

Références

1. C. BOURRY *et al.*, Free gas and gas hydrates from the Sea of Marmara, Turkey: Chemical and structural characterization, *Chem. Geol.*, **264**, 197–206 (2009).
2. K. R. NEWMAN *et al.*, Active methane venting observed at giant pockmarks along the U.S. mid-Atlantic shelf break, *Earth Planet. Sc. Lett.*, **267**, 341–352 (2008).
3. A. GAY, M. LOPEZ, C. BERNDT & M. SÉRANNE, Geological controls on focused fluid flow associated with seafloor seeps in the Lower Congo Basin, *Mar. Geol.*, **244**, 68–92 (2007).
4. A. MAZZINI *et al.*, Complex plumbing systems in the near subsurface: Geometries of authigenic carbonates from Dolgovskoy Mound (Black Sea) constrained by analogue experiments, *Mar. Petrol. Geol.*, **25**, 457–472 (2008).
5. V. HESSEL, P. ANGELI, A. GAVRILIDIS & H. LOWE, Gas-liquid and gas-liquid-solid microstructured reactors: Contacting principles and applications, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **44**, 9750–9769 (2005).
6. M. T. KREUTZER, F. KAPTEIJN, J. A. MOULIJN & J. J. HEISZWOLF, Multiphase monolith reactors: Chemical reaction engineering of segmented flow in microchannels, *Chem. Eng. Sci.*, **60**, 5895–5916 (2005).
7. P. GARSTECKI *et al.*, Formation of droplets and bubbles in a microfluidic T-junction — scaling and mechanism of break-up, *Lab Chip*, **6**, 437–446 (2006).
8. E. BRUN *et al.*, iMorph: A 3D morphological tool to fully analyze all kind of cellular materials, *Cellmet'08*, Dresden, Allemagne (2008).
9. D. SCHWEICH, *Génie de la réaction chimique*, Collection « Traité de Génie des Procédés » (TGP), Tec & Doc Lavoisier (2001).