
Étude hydrodynamique d'un écoulement diphasique pulsé dans un milieu poreux confiné

Résumé : Nous étudions un écoulement gaz-liquide dit "de Taylor" (alternance régulière de bulles de gaz et de slugs de liquide) traversant un milieu poreux (mousse carbone), de grande porosité et de longueur variée, confiné dans un canal pour différents débits. La rétention liquide apparente, définie comme la fraction volumique de liquide dans le milieu, est mesurée au cours du temps dans chaque zone du canal grâce à la visualisation par fluorescence. La distribution de temps de séjour permet une appréciation globale de la fraction de liquide dans la mousse. Nous estimons la fréquence de l'écoulement de Taylor par une fréquence théorique qui différencie les régimes d'écoulements. L'analyse du contenu fréquentiel de la rétention liquide, complétée par une étude de la corrélation entre les zones du canal, met en valeur la désorganisation de l'écoulement à travers la mousse : la fréquence principale de l'écoulement en amont laisse place à des basses fréquences dans le milieu poreux, indépendamment de la longueur du lit. Enfin nous montrons que la nature du milieu poreux influence le comportement de l'écoulement en comparant la mousse carbone avec une mousse métallique en nickel-chrome.

Mots clefs : *Milieux poreux, écoulement gaz-liquide, désorganisation*

Maîtres de stage :

Valérie Vidal^a, Régis Philippe^b, Marion Serres^{a,b}

valerie.vidal@ens-lyon.fr, rph@lgpc.cpe.fr, marion.serres@ens-lyon.fr

(a) Laboratoire de Physique, CNRS UMR 5672, École Normale Supérieure de Lyon,
Université de Lyon

46, allée d'Italie, 69007 LYON

<http://www.ens-lyon.fr/PHYSIQUE>

Tél. +33 (0)4 72 72 80 00

(b) Laboratoire de Génie des Procédés Catalytiques, CNRS UMR 5285, CPE Lyon,
Université de Lyon

LGPC - CNRS/CPE Lyon

43, bd du 11 novembre 1918, B.P. 82077, 69616 VILLEURBANNE Cedex

<https://www.lgpc.fr/>

Tél. secrétariat +33 (0)4 72 43 17 59

Remerciements

Ce stage m'a permis d'explorer la physique expérimentale de la mécanique des fluides. Je tiens à remercier les équipes des deux laboratoires qui m'ont accueilli : le LGPC et le laboratoire de physique de l'ENSL. Un grand merci à Valérie Vidal et Régis Philippe qui m'ont montré les points de vue complémentaires de physique et de chimie pour cerner un problème, ainsi qu'à Frédéric Bornette pour sa disponibilité et son aide technique sur la mise en place des manipulations. Enfin je tiens à remercier particulièrement Marion Serres qui m'a encadré tout au long de ce stage avec sympathie en me donnant de précieux conseils.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Dispositif expérimental	2
2.1	Description	2
2.2	Acquisitions et méthodes d'analyse	2
2.2.1	Visualisation directe	3
2.2.2	Distribution du temps de séjour (DTS)	3
2.2.3	Ergodicité du système	4
3	Rétention liquide dans le milieu : deux approches	5
3.1	Rétention liquide locale	5
3.1.1	Analyse dans une zone	5
3.1.2	Évolution de la rétention liquide	6
3.2	DTS et rétention liquide globale	7
3.2.1	Validation des méthodes	7
3.2.2	Temps de séjour et variance de la distribution	8
3.3	Cartographie	9
4	Désorganisation de l'écoulement	10
4.1	Caractérisation de l'écoulement de Taylor	10
4.2	Stationnarité du système	12
4.3	Évolution du spectre de l'écoulement	12
4.4	Corrélation	13
5	Influence du milieu poreux	14
5.1	Une rétention liquide similaire	14
5.2	Une décorrélation plus faible	15
6	Conclusion et perspectives	18

1 Introduction

Les écoulements multiphasiques en milieu poreux sont présents dans de nombreux domaines d'étude mais aussi à l'état naturel. Le génie chimique implique un large nombre de processus réactifs ou non dans lesquels un écoulement diphasique gaz-liquide traverse un milieu poreux solide. Pour les réactions catalytiques hétérogènes, un gaz et un liquide doivent généralement réagir en présence d'un catalyseur solide fixe (milieu poreux) ou libre (grains). De nombreuses études se sont penchées sur l'aspect de la performance globale de tels réacteurs, en quantifiant la rétention liquide (fraction volumique de liquide) et le transfert de masse [1-2-3]. En géosciences, les remontées de gaz dans les sédiments marins pourraient ouvrir le champ des nouvelles sources d'énergie [4-5] et la prédiction des digitations visqueuses dans les réservoirs de pétrole [6-7] pour améliorer le rendement de l'extraction peuvent être mentionnés parmi les nombreux exemples. La compréhension de ces phénomènes nécessitent une analyse fine des écoulements gaz-liquide dans des milieux poreux divers.

En particulier les écoulements gaz-liquide en milieu confiné ont été caractérisés par leurs diverses dynamiques résultant des débits de gaz et liquide [8]. On peut compter cinq comportements principaux différents : "film flow", "bubbly flow", "Taylor flow", "churn flow", et "annular flow" (Figure 1). De manière générale, il faut un minimum de débit de gaz pour obtenir des bulles qui occupent tout l'espace confiné séparées par des slugs de liquide, mais à trop hauts débits l'écoulement devient chaotique. La dynamique d'un écoulement de Taylor est principalement due aux forces capillaires : la longueur des bulles de gaz et l'épaisseur du film de lubrification dépendent des débits d'entrée et du canal utilisé [9]. Les écoulements diphasiques gaz-liquide peuvent ainsi être désorganisés en fonction du débit de gaz. Nous nous intéressons alors à la traversée d'un tel écoulement dans un milieu poreux.

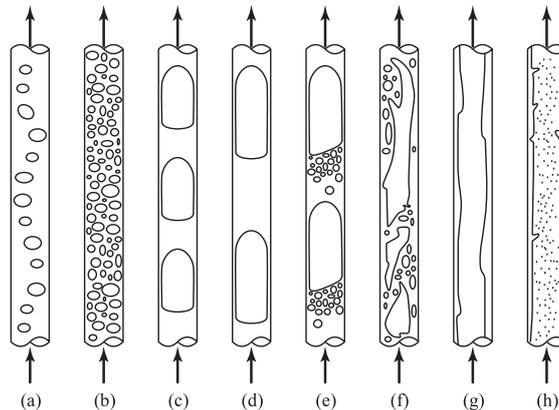


FIGURE 1 – Schéma des comportements d'écoulement observés dans des canaux capillaires en augmentant le rapport Q_G/Q_L . (a,b) "bubbly flow", (c,d) "segmented flow", (e) "transitional flow", (f) "churn flow", (g) "film flow", (h) "annular flow".

En génie catalytique, les milieux poreux sont très intéressants par la surface de contact offerte. Plus particulièrement, les mousses métalliques combinent les propriétés de support catalytique et les avantages d'un milieu poreux ouvert. Elles sont généralement très poreuses, $\phi = 75 - 95\%$, ce qui les rend très légères tout en gardant une rigidité digne du matériau de base et permettent surtout de réduire considérablement les pertes de charge en comparaison des supports type granulaire comme les charbons actifs. L'influence du milieu poreux sur la stabilité des bulles de Taylor a récemment été montrée [10]. Ici, nous nous sommes davantage penchés sur la désorganisation de l'écoulement tout au long du milieu poreux. Nous avons donc étudié un écoulement biphasique gaz-liquide à travers une mousse solide confinée dans un canal millifluidique. Après avoir cherché à caractériser la rétention liquide dans le milieu, nous avons fait une étude fréquentielle et une analyse de corrélation pour mettre en valeur la désorganisation de l'écoulement à travers la mousse. Enfin l'utilisation d'une mousse métallique a permis de montrer la dépendance du comportement de l'écoulement vis-à-vis de la nature du milieu poreux.

2 Dispositif expérimental

2.1 Description

Nous utilisons un canal millimétrique horizontal à section carrée de largeur $h = 2$ mm et de longueur $L = 24$ cm, creusé dans un bloc de PEEK (polyether ether ketone). L'une des parois est remplacée par une plaque de verre pour visualiser l'écoulement. Une fine couche de carbone (10 nm) a été déposée à l'intérieur du canal afin de garantir les mêmes conditions de mouillabilité. Le liquide (éthanol) est injecté directement dans le canal avec un débit contrôlé Q_L , et le gaz (azote) est injecté par une jonction en T avec un capillaire de rayon $r = 0.5$ mm à débit contrôlé Q_G . Nous avons étudié le système pour plusieurs débits avec une vitesse globale constante ($Q_G + Q_L$ constant), $Q_L = [2, 6, 10]$ cm³.min⁻¹ couplé à $Q_G = [10, 6, 2]$ cm³.min⁻¹. Nous avons également réalisé quelques mesures pour un rapport de débits $Q_G/Q_L = 1$, tels que $Q_G = Q_L = [4, 6, 8]$ cm³.min⁻¹. Pour ces gammes de débits l'écoulement segmenté résultant, appelé écoulement de Taylor [8], est régulier : les bulles de gaz occupent la quasi-totalité du canal (Figure 2), et le film de lubrification aux parois est très mince [9].

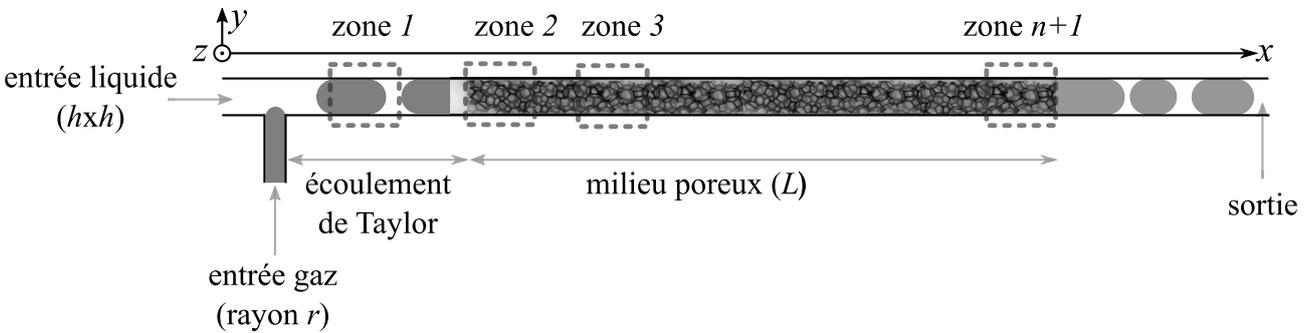


FIGURE 2 – Schéma du canal millifluidique, vu par au-dessus. Les zones correspondent aux zones d'acquisition par la suite. La zone 1 se trouve sur l'écoulement de Taylor régulier, les zones 2 à $n + 1$ sont dans le milieu poreux au milieu de chaque barreau de mousse (considérant n barreaux).

Deux milieux poreux ont été utilisés : dans un premier temps l'étude complète de l'écoulement a été faite avec une mousse carbone 80 PPI (Pore Per Inch), ERG Aerospace, de porosité constante $\phi = 96 \pm 0,3\%$ (Figure 3a). Nous disposons de barreaux de mousse de 2 cm de longueur et de section carrée 2×2 mm² correspondant aux dimensions transverses du canal. Les barreaux sont disposés les uns à la suite des autres pour former un seul milieu en négligeant les interfaces entre les barreaux. Nous avons ainsi étudié des milieux de longueur 8 cm, 12 cm et 16 cm (respectivement 4, 6 et 8 barreaux de mousse). Afin de mieux comprendre l'effet du milieu poreux sur l'écoulement, une mousse en nickel-chrome (NiCr) à 40 PPI de porosité $\phi = 89\%$ (Figure 3b) a également été utilisée avec une longueur de 16 cm (8 barreaux).

2.2 Acquisitions et méthodes d'analyse

La visualisation est réalisée grâce à une caméra (Solinocam H2D2, 107 images par seconde) montée sur un microscope à fluorescence (Olympus BX51M). La zone filmée est éclairée par une lampe à mercure montée sur le microscope. Deux méthodes de mesures ont été utilisées : la visualisation en temps réel de l'écoulement qui donne accès aux paramètres locaux, et la distribution de temps de séjour qui offre un point de vue global du système. Le traitement et l'analyse des images sont effectués avec le logiciel Matlab (Mathworks[®]).

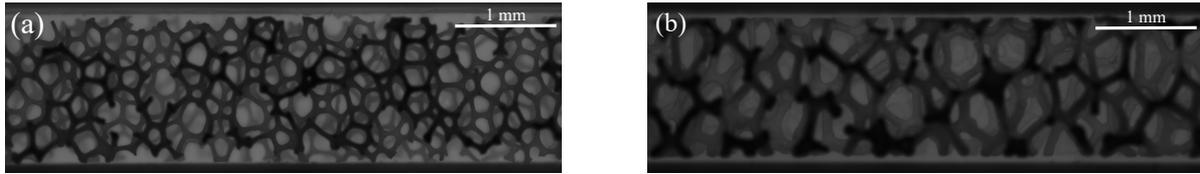


FIGURE 3 – Visualisation par microscopie à fluorescence de (a) la mousse carbone (80 PPI) et de (b) la mousse nickel-chrome (40 PPI).

2.2.1 Visualisation directe

Un traceur fluorescent (Rhodamine 6B) est dissous dans l'éthanol avant injection du liquide pour une concentration finale de $C_f = 3.2 \times 10^{-5} \text{ mol.L}^{-1}$. Un film d'une durée de 15 s est réalisé sur chaque zone : en amont sur l'écoulement de Taylor et au milieu de chaque barreau de mousse. On prend également une image de référence de la zone avec un écoulement monophasique liquide.

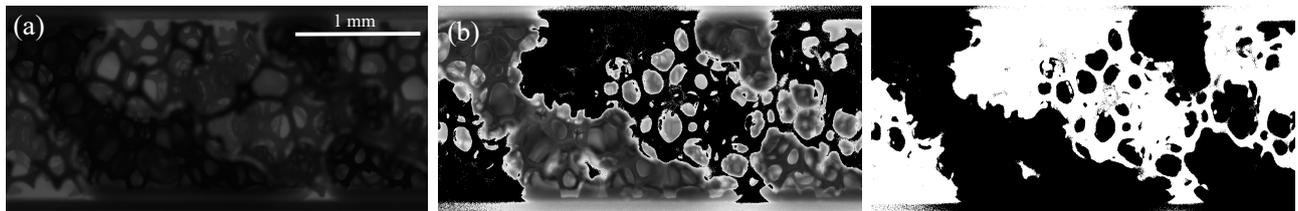


FIGURE 4 – Étapes de traitement pour une image : l'image brute (a) est divisée par la référence en liquide (b) puis est binarisée avec un seuil fixé à 0,9 (c). Le gaz apparaît en foncé puis noir, le liquide en clair puis blanc. La mousse est comptée comme liquide par la division avec la référence [mousse carbone].

Les images de chaque film sont divisées par l'image de référence, puis l'application d'un seuil fixé à 0,9 permet de binariser les images : en noir (0) le gaz et en blanc (1) le liquide et le solide. On peut alors déterminer la quantité de gaz présente sur chaque image, puis la fraction liquide en prenant soin de retrancher la porosité (pour enlever le solide compté dans le liquide). On compte le nombre de pixels (0) pour connaître la quantité de gaz ϵ_G , puis la fraction de liquide présente dans la zone est donnée par : $\epsilon_L = \phi - \epsilon_G$. L'approximation la plus forte ici est le fait qu'on analyse un système à 3 dimensions en le projetant à 2 dimensions. La profondeur de champ de la caméra nous permettait de discerner les brins de mousse au fond du canal tout en gardant une certaine netteté à la surface. Mais par exemple on ne peut pas voir une bulle derrière de la mousse, ce qui conduit à une surestimation de la fraction de liquide : on parle de rétention liquide apparente. De même le liquide et la mousse peuvent être cachés derrière une bulle de gaz passant à la surface, ce qui conduirait à une sous-estimation de la rétention liquide.

2.2.2 Distribution du temps de séjour (DTS)

Il s'agit d'une approche statistique pour caractériser l'écoulement très souvent utilisée en génie chimique. On considère un élément de fluide à l'entrée du canal, et on mesure le temps qu'il met pour atteindre la sortie. En prenant ensuite plusieurs particules élémentaires de fluide, on obtient une distribution de temps de séjour. En effet, les particules n'auront pas mis exactement le même temps pour traverser le milieu, notamment à cause de l'existence de zones stagnantes, de court-circuits ou de

tortuosités. Cette méthode nécessite plusieurs hypothèses pour être validée : état stationnaire, fluide incompressible, transport par convection et diffusion, et les diamètres d'entrée et de sortie du flux doivent être petits par rapport à la section du canal.

Expérimentalement, nous avons utilisé une injection par impulsion : un dirac de traceur (fluorescent) est introduit dans l'écoulement de liquide. Un film est réalisé en amont du milieu poreux dans l'écoulement de Taylor, et un autre à la sortie de la mousse, tout en synchronisant les acquisitions. Nous utilisons le cumul du signal et non l'intégrale pour obtenir nos signaux (Figure 5b) afin de prendre en compte la réelle quantité de liquide entre deux pulses, c'est-à-dire les films de liquide autour des bulles de gaz, et non une section efficace remplie de phase liquide.

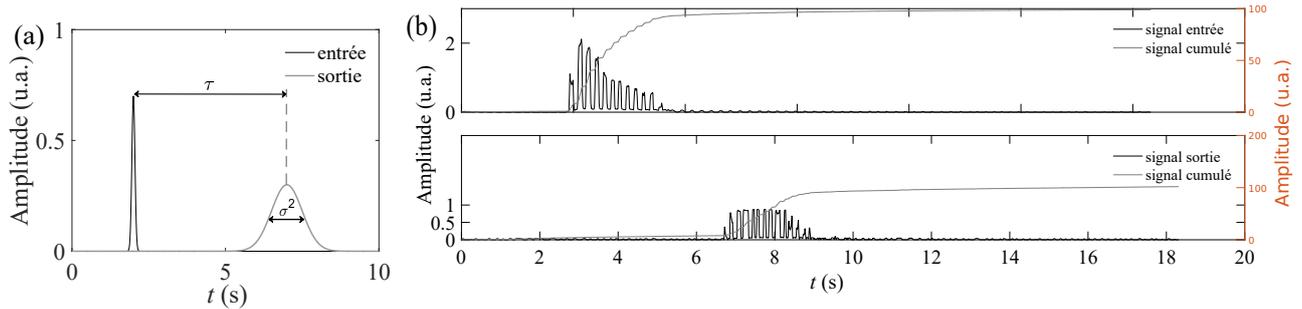


FIGURE 5 – (a) Schéma du principe de la distribution du temps de séjour (DTS) et (b) exemple de signal obtenu en entrée (haut) et sortie (bas), représentés avec le signal cumulé [mousse carbone, 6 barreaux, $Q_G = Q_L = 6 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$]

De manière générale, on récupère une gaussienne piquée caractéristique du dirac en entrée et une gaussienne aplatie en sortie. Le temps τ (1^{er} moment) entre les deux gaussiennes est le temps de séjour dans le réacteur. La variance (1^{ème} moment) σ^2 du signal est récupérée sur la largeur à mi-hauteur du signal en sortie, en considérant que le signal d'entrée est un dirac parfait : $\sigma_1^2 = 0 \text{ s}$ (Figure 5a). Habituellement, la déconvolution du signal d'entrée par celui de la sortie permet alors d'obtenir la distribution de temps de séjour, la rétention liquide globale ϵ_L et la variance du signal au sein du milieu poreux en s'affranchissant des perturbations liées à l'injection. Mais expérimentalement, les signaux ne sont pas assez propres, et les erreurs commises en faisant la transformée de Fourier seraient trop grandes. Ainsi une méthode de convolution avec un modèle $CSTR_4$ a été utilisée à la place [1]. La rétention liquide globale du réacteur est alors retrouvée avec :

$$\epsilon_L = \frac{Q_L \cdot \tau}{V} \quad \text{avec } V \text{ le volume du réacteur considéré.}$$

2.2.3 Ergodicité du système

En milieu non contraint, les conditions initiales appliquées au milieu poreux peuvent influencer la dynamique d'écoulement. Ici, plusieurs conditions initiales ont été testées afin de vérifier leur influence en écoulement contraint. Le milieu initial peut être sec (en laissant un écoulement monophasique gazeux), puis on injecte le liquide ; ou inversement. En faisant la moyenne de toutes les images sur la durée du film, nous obtenons une cartographie de la probabilité de passage de liquide au sein de la zone étudiée. Après application de cette méthode sur deux séries de mesures avec les débits $Q_G = Q_L = 6 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ dont les conditions initiales étaient différentes, nous montrons que la cartographie est identique sur un film de 15 s. En effet, sur la carte des résidus, aucune différence sensible n'est relevée ($< 20\%$) (Figure 6c).

On peut expliquer ce résultat grâce au confinement. En industrie chimique, les réacteurs ne sont généralement pas autant contraints en volume : ils ne sont pas confinés et l'ergodicité n'est généralement pas vérifiée. Mais ici, notre canal est dans un confinement tel que les conditions initiales n'ont

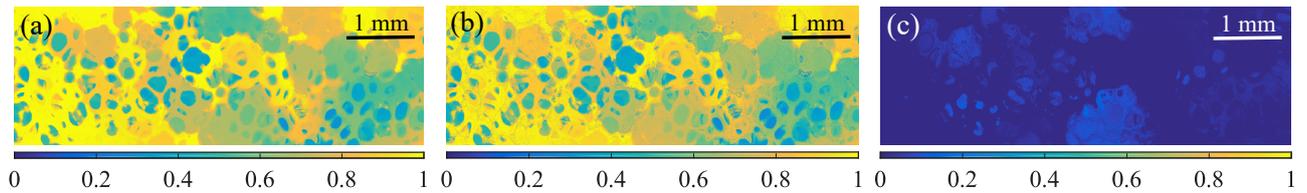


FIGURE 6 – Test d’ergodicité du système : cartographies de probabilité de passage du liquide sur un film de 15 s pour des conditions initiales (a) liquide et (b) sèche. La carte des résidus (c) permet de confirmer l’indépendance de l’écoulement par rapport aux conditions initiales sur la durée d’acquisition [mousse carbone, $Q_G = Q_L = 6 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$].

pas d’influence notable sur l’écoulement pour une étude qui dure suffisamment longtemps.

Dans la suite de l’étude, nous travaillons de manière à avoir un système a priori stationnaire : on laisse l’écoulement de Taylor se stabiliser en amont de la mousse sur quelques secondes avant de commencer l’acquisition.

3 Réétention liquide dans le milieu : deux approches

3.1 Réétention liquide locale

L’analyse des films en visualisation directe sur chaque zone permet de remonter à la rétention liquide ϵ_L (fraction de liquide dans la zone étudiée) au cours du temps, qui caractérise directement l’écoulement instantané au sein de la zone.

3.1.1 Analyse dans une zone

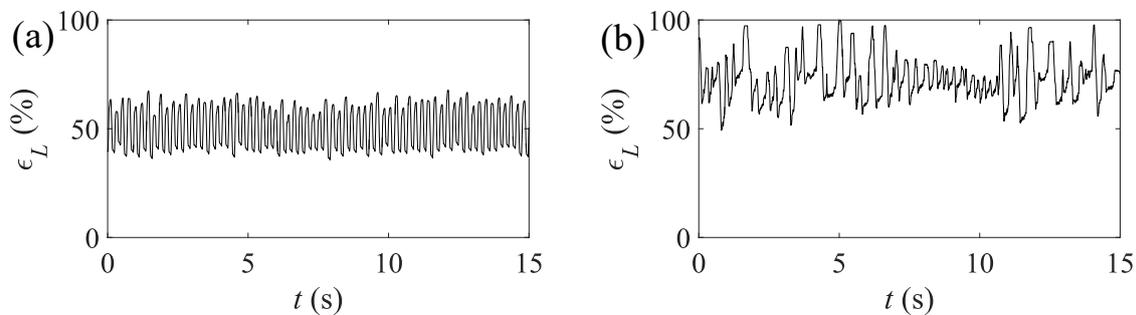


FIGURE 7 – Exemples de rétention liquide ϵ_L au cours du temps : écoulement de Taylor régulier (a) et 4ème barreau (b). On note une augmentation de la rétention liquide dans la mousse et une déstructuration du signal [mousse carbone, 4 barreaux, $Q_G = Q_L = 4 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$].

L’écoulement de Taylor en amont du milieu poreux est régulier (Figure 7(a)) : l’amplitude et la période du signal sont clairement définies, avec le passage des bulles de gaz qui occupent la quasi-totalité du canal. Dans le milieu poreux (Figure 7b), le signal de fraction liquide perd son organisation : il semble difficile de trouver une fréquence principale et les variations d’amplitude sont plus importantes. Il existe des instants où le liquide occupe tout l’espace ($\epsilon_L = 100\%$), et d’autres pour lesquels le gaz semble piégé (les variations de ϵ_L sont très faibles).

En comparant les signaux de fraction liquide pour l’écoulement de Taylor sur les différents débits et les différents longueurs de lit étudiés, il apparaît que la moyenne de rétention liquide dépend

uniquement des débits (Figure 8). Il n'y a pas d'influence notable du nombre de barreaux de mousse de carbone sur l'écoulement en amont.

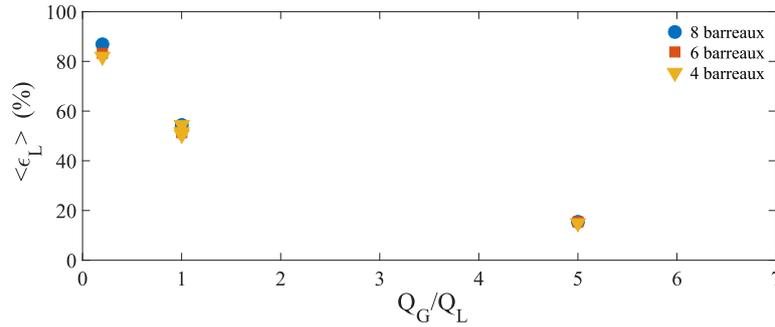


FIGURE 8 – Rétention liquide moyenne des écoulements de Taylor en fonction du rapport des débits Q_G/Q_L . La fraction liquide en amont est indépendante de la longueur du lit de mousse en carbone.

3.1.2 Évolution de la rétention liquide

La moyenne de la rétention liquide étant stationnaire, on peut s'astreindre de la composante temporelle pour se pencher sur l'évolution de $\langle \epsilon_L \rangle = \langle \epsilon_L \rangle_t$ en fonction de la longueur de mousse traversée. On obtient ainsi des courbes avec $n + 1$ points, avec n le nombre de barreaux, en comptant la rétention liquide moyenne de chaque zone et celle de l'écoulement de Taylor (Figure 9a), en fonction de la distance d dans le milieu poreux ($d = 0$ cm à l'entrée de la mousse). De manière générale, la fraction liquide augmente à l'entrée du milieu poreux sur 2 barreaux puis varie autour d'une valeur moyenne. Les fortes variations peuvent être dues à des défauts dans la mousse solide. Par exemple un trou laissera passer le gaz beaucoup plus facilement, le liquide reste donc plus longtemps dans la zone, ce qui augmente $\langle \epsilon_L \rangle$.

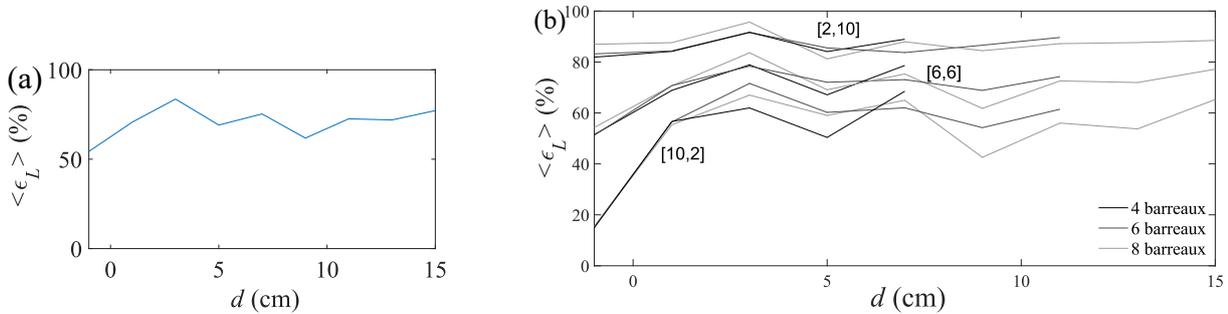


FIGURE 9 – (a) Rétention liquide moyenne : augmentation sur les deux premières zones puis variations autour d'une valeur moyenne haute [mousse carbone, 8 barreaux, $Q_G = Q_L = 6 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$]. (b) Rétention liquide moyenne pour différentes longueurs de milieu poreux, et pour les trois couples de débits étudiés $[Q_G, Q_L]$.

L'analyse sur tous les couples de débits et chaque longueur de lit de mousse carbone (Figure 7b) montre que les variations de la rétention entre les zones sont d'autant plus grandes que le débit de gaz est élevé. On retrouve globalement les mêmes résultats quelle que soit la longueur du lit, ce qui met en avant l'indépendance de l'écoulement par rapport au milieu qui le succède : il n'y a pas de rétroaction. Les variations de chaque débit sont similaires sur les barreaux de mousse du fait de la structure locale de chaque zone.

3.2 DTS et rétention liquide globale

La distribution de temps de séjour donne une mesure de la rétention liquide globale du milieu traversé par l'écoulement. Dans un premier temps, il a été nécessaire de calibrer le canal pour vérifier le volume du canal, et donc sa section. Pour ce faire, nous avons réalisé une DTS sur un écoulement monophasique liquide dans le canal vide (sans mousse). La section est alors paramétrée en cherchant une rétention liquide $\langle \epsilon_L \rangle = 100\%$. Nous avons trouvé une section un peu supérieure à ce qui était attendu à la fabrication : $s = 2.1 \times 2.1 \text{ mm}^2$.

4 barreaux					6 barreaux				8 barreaux			
Q_G	2	6	10		Q_G	2	6	10	Q_G	2	6	10
Q_L	10	6	2		Q_L	10	6	2	Q_L	10	6	2
$\epsilon_L(\%)$	0.4*	0.44*	0.71	0.67	$\epsilon_L(\%)$	1.13*	0.71	0.59	$\epsilon_L(\%)$	1.20*	0.73	0.64

TABLE 1 – Résumé des résultats de rétention liquide obtenus par DTS, pour tous les débits étudiés et toutes les longueurs de lit de la mousse carbone. Certaines valeurs (*) sont physiquement non acceptables à cause des limites matérielles du dispositif expérimental.

Les valeurs de rétention liquide sont résumées dans le tableau 1. Des valeurs pour le moins étonnantes sont obtenues pour le couple de débits $[Q_G = 2, Q_L = 10 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}]$, ainsi que de manière générale sur le lit de 4 barreaux. La rétention liquide ne peut pas dépasser la valeur de la porosité, et doit être au moins aussi grande que la valeur de Taylor en amont du milieu poreux. Nous touchons ici aux limites des outils expérimentaux. En effet, l'injection du dirac de fluorescent effectuée avec une vanne à 6 voies perturbe l'écoulement liquide, d'autant plus que celui-ci est grand, ce qui explique les valeurs non physiques pour $Q_L = 10 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Ensuite la synchronisation de l'instant initial pour l'entrée et la sortie était faite à la main. Il va de soit que pour une mousse de 8 cm de longueur (4 barreaux), le temps de séjour est très court et les quelques dizaines de secondes de différences sur la synchronisation peuvent se ressentir très rapidement.

3.2.1 Validation des méthodes

Les deux approches offrent des points de vue différents : la visualisation sur chaque zone permet une connaissance locale de la rétention liquide, et la DTS la mesure globalement sur l'ensemble du milieu poreux. Mais elles donnent a priori la même information de rétention liquide globale. En effet, la moyenne de la fraction liquide locale dans le milieu poreux correspond généralement à la valeur donnée par la DTS (Figure 10a), sauf pour les valeurs non physiques de la DTS (Figure 10b).

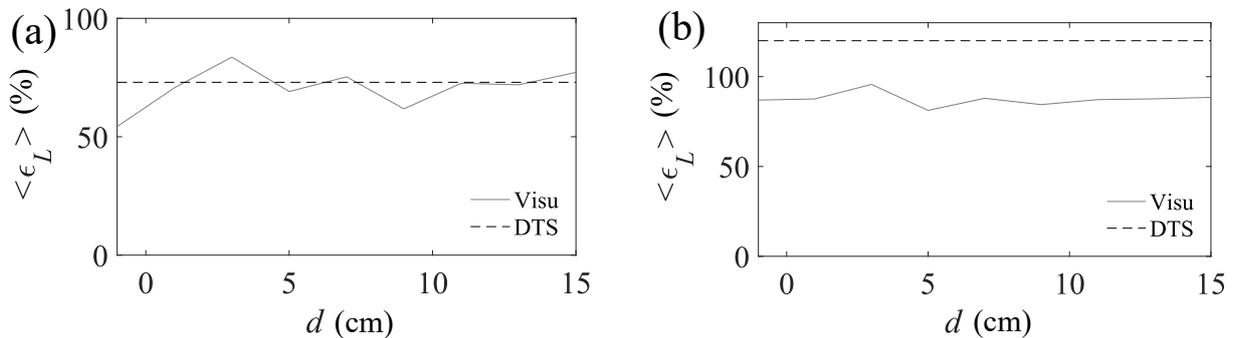


FIGURE 10 – Comparaison de la rétention liquide donnée par la DTS (pointillés) et par la visualisation. La moyenne sur la distance de la fraction liquide de visualisation correspond à la mesure donnée par la DTS. (a) $Q_G = Q_L = 6 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, (b) $Q_G = 2, Q_L = 10 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ [mousse carbone, 8 barreaux].

La moyenne de l'écart relatif entre la rétention liquide du milieu mesurée par DTS et mesurée avec la visualisation sur chaque zone est de 13,4% en comptant tous les points. Si on enlève les valeurs non physiques (décrites ci-dessus), cet écart tombe à 3,5%. Les deux méthodes permettent ainsi de se valider l'une l'autre puisque les résultats concordent.

3.2.2 Temps de séjour et variance de la distribution

La DTS donne en premier lieu le temps de séjour τ : le temps passé entre le signal d'entrée et de sortie. Le temps de séjour est linéaire en fonction de la longueur du lit, mais avec un coefficient directeur propre à chaque couple de débits (Figure 11(a)). De même la variance σ^2 augmente avec la longueur du lit, en retirant les valeurs non physiques ((Figure 11(b)) : le temps de séjour est plus long donc le dirac de fluorescence est plus diffusé à la sortie. Deux régimes de dispersion sont distingués [2] : σ^2 devrait être proportionnel à la longueur du milieu poreux dans le cas d'effets purement diffusifs, et proportionnel au carré de la longueur dans le cas d'effets convectifs. Ici la tendance serait principalement aux effets diffusifs mais la convection est toujours présente.

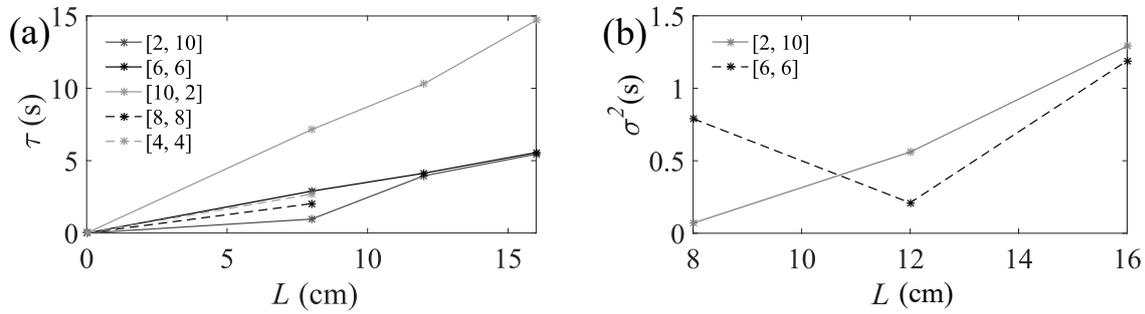


FIGURE 11 – (a) Temps de séjour τ et (b) variance σ^2 en fonction de la longueur L totale du lit de mousse. On trouve une dépendance linéaire pour chacun en excluant les valeurs non physiques de la DTS. La variance proportionnelle à la longueur met en valeur les effets diffusifs $[Q_G, Q_L]$.

En considérant que le coefficient directeur de $\tau(L)$ est proportionnel à l'inverse de la vitesse de l'écoulement liquide, on peut essayer de trouver le lien entre la vitesse globale de l'écoulement et les débits (Figure 12(a)).

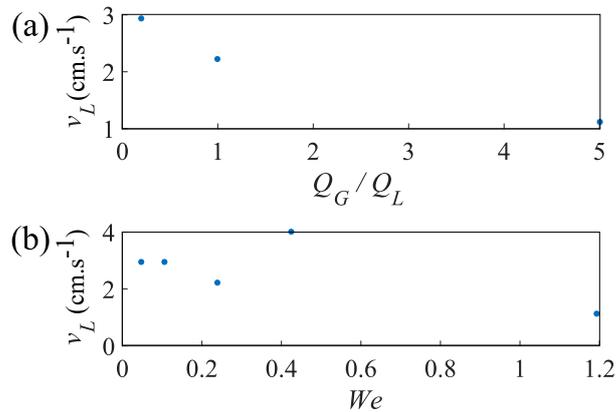


FIGURE 12 – Vitesse de l'écoulement liquide en fonction (a) du rapport des débits gaz et liquide Q_G/Q_L tel que $Q_G + Q_L = 12 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, et (b) du nombre de Weber modifié We .

La vitesse de l'écoulement liquide décroît lorsque le débit de gaz augmente et le débit de liquide diminue. On retrouve bien que la vitesse liquide est proportionnelle au débit de liquide. Le nombre de Weber modifié We permet de distinguer différents régimes d'écoulements [10].

$$We = \left(\frac{Re_G}{Re_L} \right) \cdot \frac{\rho_L (Q_G + Q_L)^2 d_w}{(n_w S_w)^2 \sigma} \quad (1)$$

avec les nombres de Reynolds $Re_G = \rho_G Q_G / \mu_G h$, $Re_L = \rho_L Q_L / \mu_L h$, la surface typique des pores $S_w = 0.080 \text{ mm}^2$ et leur nombre dans une section $h \times h$, $n_w = 5$, et la tension de surface $\sigma = 22 \text{ mN.m}^{-1}$. On a alors :

$$We = \left(\frac{\rho_G}{\sigma} \right) \left(\frac{\mu_L}{\mu_G} \right) \left(\frac{Q_G}{Q_L} \right) \left(\frac{Q_G + Q_L}{n_w S_w} \right)^2 d_w \quad (2)$$

avec $\rho_G = 1.25 \text{ kg.m}^{-3}$, $\mu_L = 1.15 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$, $\mu_G = 1.76 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$, et le diamètre moyen des pores $d_w = 257 \text{ }\mu\text{m}$.

En excluant le point correspondant à $Q_G = Q_L = 8 \text{ cm}^3.\text{min}^{-1}$, la vitesse de l'écoulement liquide en fonction du nombre de Weber modifié montre un palier à vitesse constante pour les faibles Weber puis une décroissance.

Les résultats complets de DTS sont présentés en annexe (Table 3).

3.3 Cartographie

La probabilité de passage de liquide sur chaque zone permet de se rendre compte des chemins préférentiels de l'écoulement. La visualisation à l'échelle du pore nous montre les bulles de gaz piégées, et les zones de mélange (Figure 13). La quantité de mélange est très importante pour le génie chimique dans la prévision de réaction gaz-liquide-solide dans un écoulement sur le support d'un catalyseur. L'application des seuils liquide ($> 70\%$) et gaz ($< 30\%$) rend compte des zones de mélange : si le liquide a une probabilité de passage inférieure à 30% on considère que c'est une zone de gaz, si la probabilité de liquide est supérieure à 70% c'est une zone de liquide. Toutes les zones entre ces deux seuils sont dites zones de mélange, le gaz et le liquide passent de manière à peu près équiprobable.

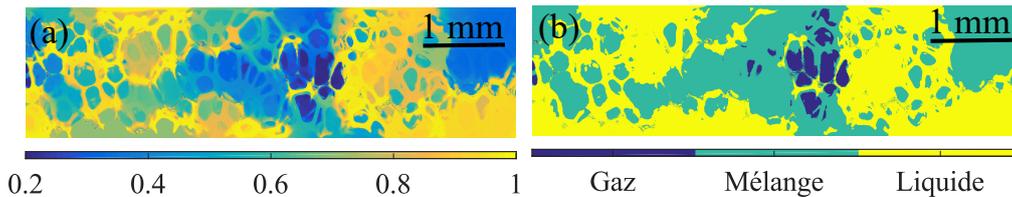


FIGURE 13 – (a) Exemple de cartographie de probabilité de passage de liquide (0 : gaz, 1 : liquide), (b) et avec seuils de gaz (30%) et de liquide (70%) pour faire apparaître les zones de mélange [mousse carbone, 8 barreaux, $Q_G = Q_L = 6 \text{ cm}^3.\text{min}^{-1}$].

On peut alors calculer la surface de mélange moyenne en fonction des débits et de la distance parcourue dans le milieu poreux (Figure 14). Aucune tendance n'est apparue en fonction de la distance ou des débits. Mais globalement, la surface mélangée est plus grande pour $Q_G/Q_L = 1$.

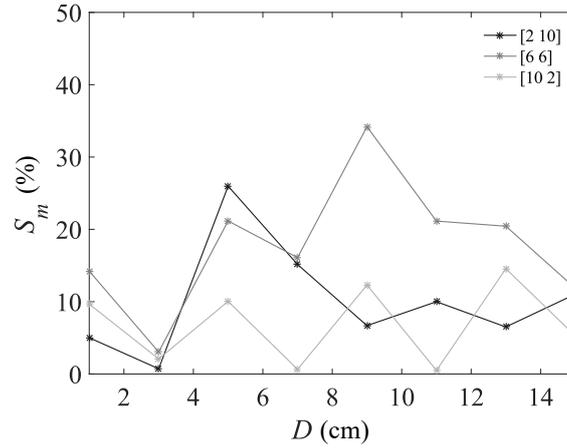


FIGURE 14 – Surface mélangée moyenne de chaque zone en fonction de la distance dans le milieu poreux pour différents couples de débits $[Q_G, Q_L]$, [mousse carbone]. De manière générale, la surface mélangée est plus grande pour $Q_G/Q_L = 1$.

4 Désorganisation de l'écoulement

Nous nous intéressons ici à l'aspect du signal de rétention liquide sous d'autres points de vue. En amont de la mousse solide l'écoulement est périodique et régulier. Grâce à une étude fréquentielle, nous analysons l'évolution du spectre de l'écoulement à travers le milieu. Puis une étude de la corrélation entre la rétention liquide de chaque zone permettra de mieux cerner l'organisation de l'écoulement dans la mousse.

4.1 Caractérisation de l'écoulement de Taylor

Il a été montré qu'il existait plusieurs modes d'écoulement gaz/liquide en fonction des débits [2]. Nous cherchons tout d'abord à avoir une description fréquentielle plus fine de l'écoulement de Taylor en amont du milieu poreux. La longueur des bulles dépend directement des débits de gaz et liquide en entrée (pour un canal donné). Pour être certain de ne pas avoir de perturbations dues à la mousse, les acquisitions des rétentions liquides de Taylor ont été réalisées en fût vide (canal sans mousse). Les longueurs de bulles ont une relation affine avec le rapport des débits [10] (Figure 15(a)) :

$$\frac{l_B}{h} = 1 + 0,45 \cdot \left(\frac{Q_G}{Q_L}\right) \quad (3)$$

Les signaux de rétention liquide des écoulements de Taylor sont réguliers et leur diagramme temps-fréquence donne une fréquence principale avec éventuellement des harmoniques (Figure 17(a)). Pour adimensionner cette fréquence, nous utilisons une fréquence dite théorique :

$f_{th} = \frac{U}{\lambda}$ avec $U = \frac{Q_G + Q_L}{h^2}$ la vitesse globale de l'écoulement et $\lambda = l_B \cdot \left[1 + \frac{Q_L}{Q_G}\right]$ la longueur d'une cellule unitaire (une bulle de gaz et un slug de liquide). On a alors :

$$f_{th} = \frac{Q_G + Q_L}{h^3} \cdot \frac{1}{1,45 + 0,45 \cdot \frac{Q_G}{Q_L} + \frac{Q_L}{Q_G}} \quad (4)$$

Pour valider l'estimation théorique, on la calcule pour chaque couple de débits en fonction de la fréquence expérimentale (Figure 15(b)). On trouve $f_{exp} = f_{th}$, seul le couple $Q_G = Q_L = 8 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ sort du comportement général et est considéré comme non valide. La fréquence théorique correspond donc bien à la fréquence de l'écoulement de Taylor en amont du milieu poreux.

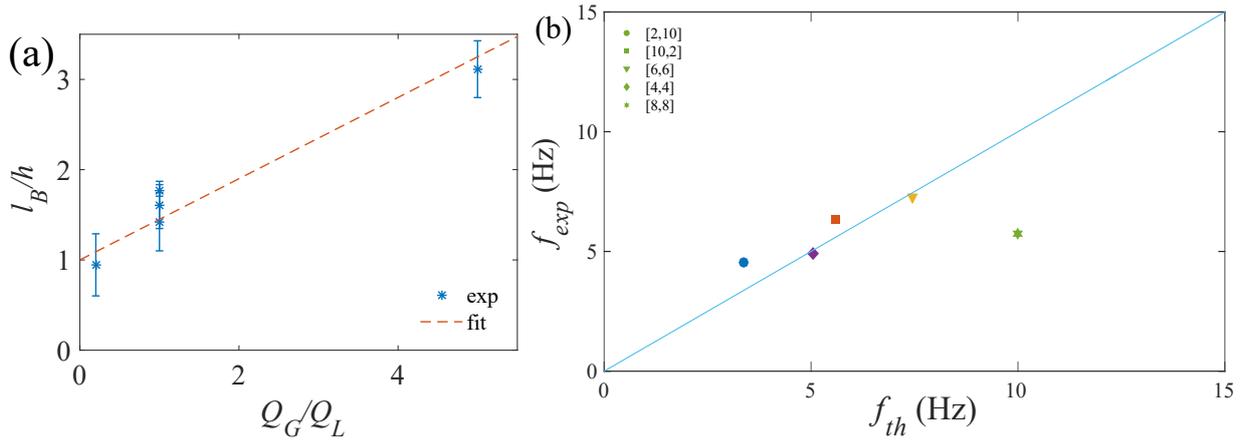


FIGURE 15 – (a) Longueur de bulle l_B , normalisée avec la largeur du canal h , en fonction du rapport des débits Q_G/Q_L ($l_B/h = 1 + 0,45 \cdot (Q_G/Q_L)$). (b) Validation de l'estimation théorique par comparaison avec la fréquence expérimentale de chaque couple de débits : $f_{exp} = f_{th}$.

En comparant de la même manière cette fréquence théorique avec les fréquences principales des écoulements de Taylor avec la mousse solide présente en aval, nous obtenons également une égalité (Figure 16), en dehors de quelques points mesurés à haut débit de gaz $Q_G = [35 - 25 - 16 - 10] \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Il n'y a donc pas d'influence notable de la mousse carbone sur l'écoulement en amont. On a ici possiblement une façon de différencier des régimes d'écoulement : les écoulements de Taylor suivent la fréquence théorique. Les points qui ne suivent pas la tendance linéaire montrent alors les écoulements perturbés à trop haut débit de gaz.

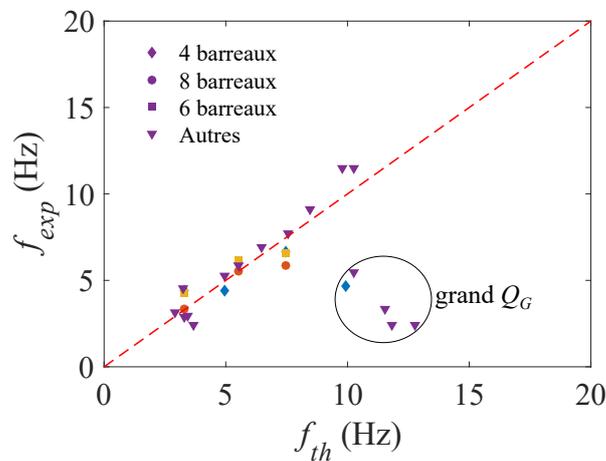


FIGURE 16 – Comparaison de la fréquence théorique avec les mesures expérimentales de l'écoulement de Taylor avec la mousse carbone en aval, pour 4, 6, 8 barreaux ainsi que les mesures "Autres" réalisées par M. Serres. Les points passent par la droite $f_{exp} = f_{th}$, en-dehors de quelques exceptions à haut débit de gaz : $Q_G = [35 - 25 - 16 - 10] \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$.

Nous allons désormais nous pencher sur différents aspects de l'évolution de l'écoulement lors de son passage dans le milieu poreux.

4.2 Stationnarité du système

Précédemment la dimension temporelle de la rétention liquide a été moyennée en raison de la très faible variation en amplitude de la moyenne de $\epsilon(t)$. Ici le diagramme temps-fréquence des zones (Taylor et au milieu de chaque barreau de mousse solide) est tracé pour vérifier que l'écoulement est stationnaire : par exemple pour la zone 1 et la zone 5 (Figure 17(a),(b)).

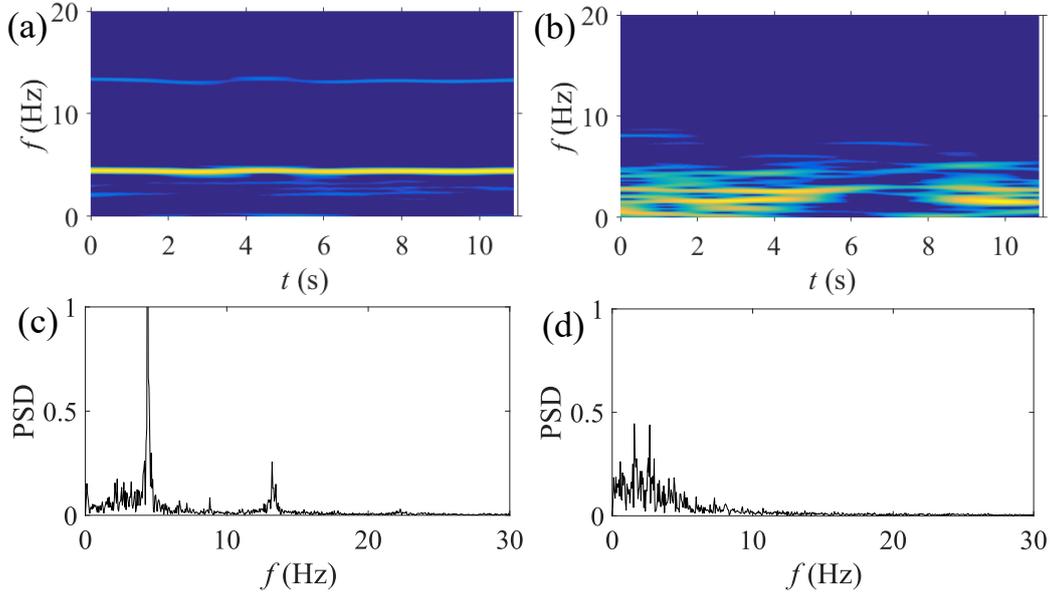


FIGURE 17 – Diagrammes temps fréquence et spectres pour (a,c) l'écoulement de Taylor et le 4^{ème} barreau (c,d). La fréquence principale présente en amont laisse place à des basses fréquences plus diffuses dans la mousse. On considère que le spectre est temporellement stationnaire et on utilisera sa moyenne par la suite [mousse carbone, 4 barreaux, $Q_G = Q_L = 4 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$].

On retrouve une fréquence principale nette et constante sur l'écoulement de Taylor, ainsi que parfois des harmoniques sur certains signaux. Le diagramme temps-fréquence à l'intérieur du milieu poreux est plus diffus : aucune fréquence principale n'est présente et les basses fréquences se développent. Cependant on peut considérer que la dimension temporelle peut là aussi être moyennée afin de ne travailler que sur les spectres de puissance en fonction de la distance dans le lit.

4.3 Évolution du spectre de l'écoulement

Afin de mettre en valeur l'arrangement du spectre de fréquence dans la mousse solide, nous interpolons les spectres sur les différentes zones étudiées, c'est-à-dire sur la distance d parcourue dans le milieu. Ils sont normalisés sur le maximum des spectres (énergie en annexe Figure 27). L'interpolation ne rajoute pas de points absurdes sur le spectre : voir annexe (Figure 26).

Dans tous les cas, la fréquence principale bien présente en amont se perd à l'entrée du milieu, ou après quelques barreaux (Figure 18(a)). Des fréquences plus basses apparaissent à partir du 2^{ème} ou 3^{ème} barreau, et sont plus puissantes pour un grand débit de gaz. Plus précisément, on retrouve un régime modulé [10] pour le couple de débits $Q_G = 10, Q_L = 2 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ (grand rapport Q_G/Q_L) : l'écoulement est désorganisé dès l'entrée du milieu poreux. Mais on garde un régime de Taylor pour les autres couples de débits étudiés ici (faible rapport Q_G/Q_L) : la fréquence principale en amont reste présente sur quelques barreaux de mousse. Ces résultats ne dépendent pas de la longueur du milieu poreux.

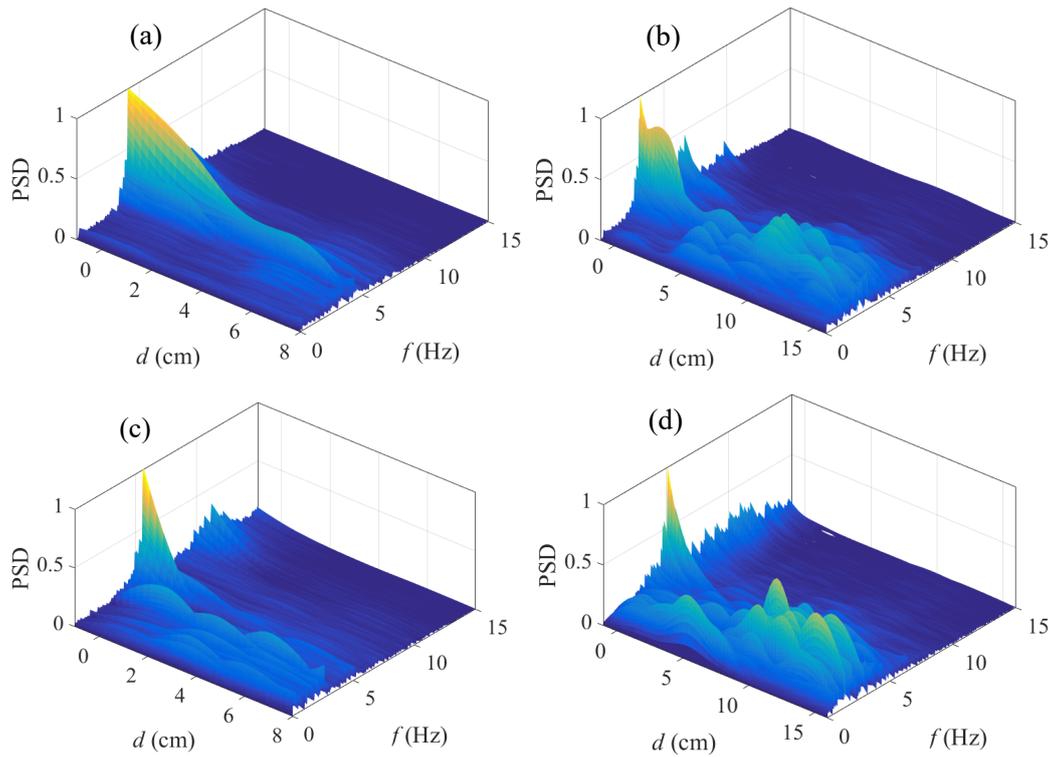


FIGURE 18 – Spectres de puissance (PSD en fonction de f) de chaque zone interpolés sur la distance d dans le milieu pour $Q_G = 2, Q_L = 10 \text{ cm}^3.\text{min}^{-1}$ (a,b) et $Q_G = 10, Q_L = 2 \text{ cm}^3.\text{min}^{-1}$ (c,d) sur 4 (a,c) et 8 (b,d) barreaux, normalisés sur le maximum [mousse carbone].

4.4 Corrélation

Pour compléter l'analyse fréquentielle, nous avons étudié la corrélation entre le signal de rétention liquide de l'écoulement de Taylor et celui de chaque zone au sein du milieu (Figure 19).

La corrélation diminue clairement en fonction de la distance dans le milieu, ce qui confirme la désorganisation de l'écoulement au sein de la mousse par rapport à celui de Taylor en amont. Pour $Q_G = 10, Q_L = 2 \text{ cm}^3.\text{min}^{-1}$, on retrouve un régime modulé : le signal n'a presque plus de corrélation avec celui de Taylor dès le 1^{er} barreau. Au contraire, les débits $Q_G = 2, Q_L = 10 \text{ cm}^3.\text{min}^{-1}$ montrent une décorrélation progressive de l'écoulement (régime de Taylor). On peut alors tracer le maximum de la corrélation en fonction de la longueur parcourue (Figure 20). Il décroît plus ou moins rapidement dans le milieu en fonction des débits de gaz et liquide.

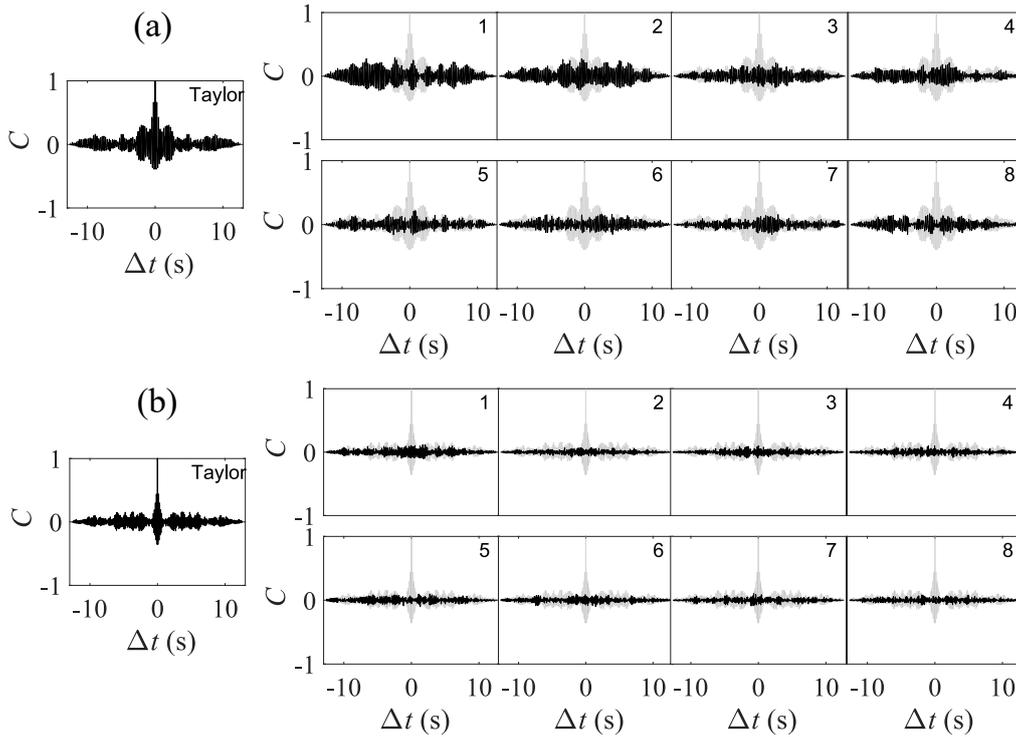


FIGURE 19 – Figures de corrélation entre l'écoulement de Taylor et celui de chaque zone étudiée pour (a) $Q_G = 2, Q_L = 10 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ et (b) $Q_G = 10, Q_L = 2 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ (corrélation C en noir, Taylor en gris, en fonction du lag Δt) [mousse carbone, 8 barreaux].

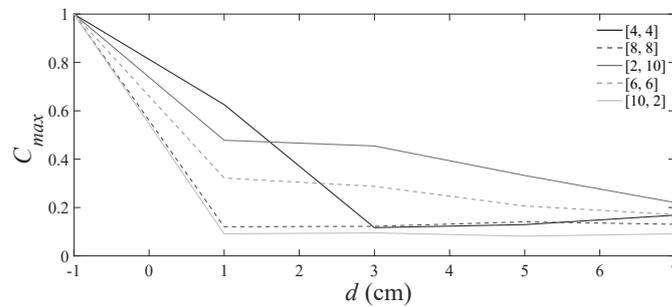


FIGURE 20 – Maxima des corrélations $[Q_G, Q_L]$ -[mousse carbone, 8 barreaux].

5 Influence du milieu poreux

La structure locale du milieu a une grande influence sur le comportement de l'écoulement qui le traverse. Nous avons donc étudié une mousse métallique en nickel-chrome (NiCr) afin de mieux comprendre l'effet unique de chaque milieu poreux. La mousse métallique a une porosité $\phi = 89\%$ un peu plus faible (carbone : $\phi = 96\%$) pour une structure de 40 PPI (carbone : 80 PPI). Nous utilisons un lit de 8 barreaux donc 16 cm de mousse, dans le même dispositif expérimental que précédemment.

5.1 Une rétention liquide similaire

Afin de comparer les rétentions liquides des milieux qui n'ont pas la même porosité, nous utilisons la saturation liquide telle que $S_L = \epsilon_L / \phi$. Elle est mesurée pour la mousse NiCr sur trois couples de

débits puis comparée aux résultats précédents de la mousse carbone par visualisation directe (Figure 21), et par DTS (Table 2).

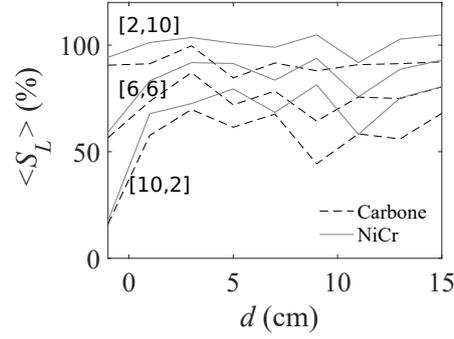


FIGURE 21 – Comparaison des rétentions liquides obtenues par visualisation sur les mousses carbone et NiCr, pour trois couples de débits $[Q_G, Q_L]$ -[8 barreaux].

Q_G	Q_L	$S_L(C)$	$S_L(NiCr)$
2	10	1.25	1.02
6	6	0.76	0.75
10	2	0.67	0.67

TABLE 2 – Comparaison des valeurs de rétention liquide obtenues par DTS entre la mousse carbone et la mousse NiCr [8 barreaux].

La saturation liquide est légèrement supérieure dans la mousse en nickel-chrome : les pores étant plus gros, le gaz est globalement moins piégé et le liquide est plus présent. Mais les résultats restent très proches comme le montre la DTS, avec une porosité quasi-identique.

5.2 Une décorrélation plus faible

En comparant directement les spectres de puissance interpolés sur la distance dans le milieu poreux, on retrouve les deux comportements : le régime modulé (Figure 22(c-d)) avec $Q_G = 10, Q_L = 2 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ pour lequel la fréquence principale est perdue dès l'entrée dans la mousse avec l'apparition de basses fréquences, et le régime de Taylor (Figure 22(a-b)) avec $Q_G = 2, Q_L = 10 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ pour lequel la fréquence principale reste présente sur quelques barreaux. Cependant dans la mousse NiCr, la fréquence principale de l'écoulement de Taylor reste tout au long du milieu poreux (Figure 22(a)), même si elle perd en intensité et que des basses fréquences sont présentes dans la mousse. La désorganisation est donc beaucoup moins rapide, on peut penser qu'il faudrait un milieu poreux plus long pour voir une perte totale de la fréquence principale.

L'analyse de la corrélation de l'écoulement entre les zones de visualisation montre encore mieux ce résultat (Figure 23). Pour $Q_G = Q_L = 6 \text{ cm}^3.\text{min}^{-1}$, la corrélation dans la mousse carbone diminue au fur et à mesure de l'avancée dans le milieu, mais dans la mousse NiCr elle reste importante tout au long du lit. La comparaison des maxima de la corrélation entre tous les débits (Figure 24) montre que la corrélation est généralement plus élevée dans la mousse NiCr que dans la mousse carbone : l'écoulement est moins désorganisé pour le régime de Taylor ($Q_G = Q_L = 6 \text{ cm}^3.\text{min}^{-1}$ et $Q_G = 2, Q_L = 10 \text{ cm}^3.\text{min}^{-1}$). Il n'y a pas de différence notable pour le régime modulé ($Q_G = 10, Q_L = 2 \text{ cm}^3.\text{min}^{-1}$), pour lequel l'écoulement se désorganise dès le premier barreau de mousse dans les deux cas. On retrouve donc des résultats similaires concernant les deux régimes d'écoulement dans le milieu pour les deux mousses. La désorganisation est cependant plus rapide pour la mousse carbone, ce qui montre l'influence de la nature du milieu poreux.

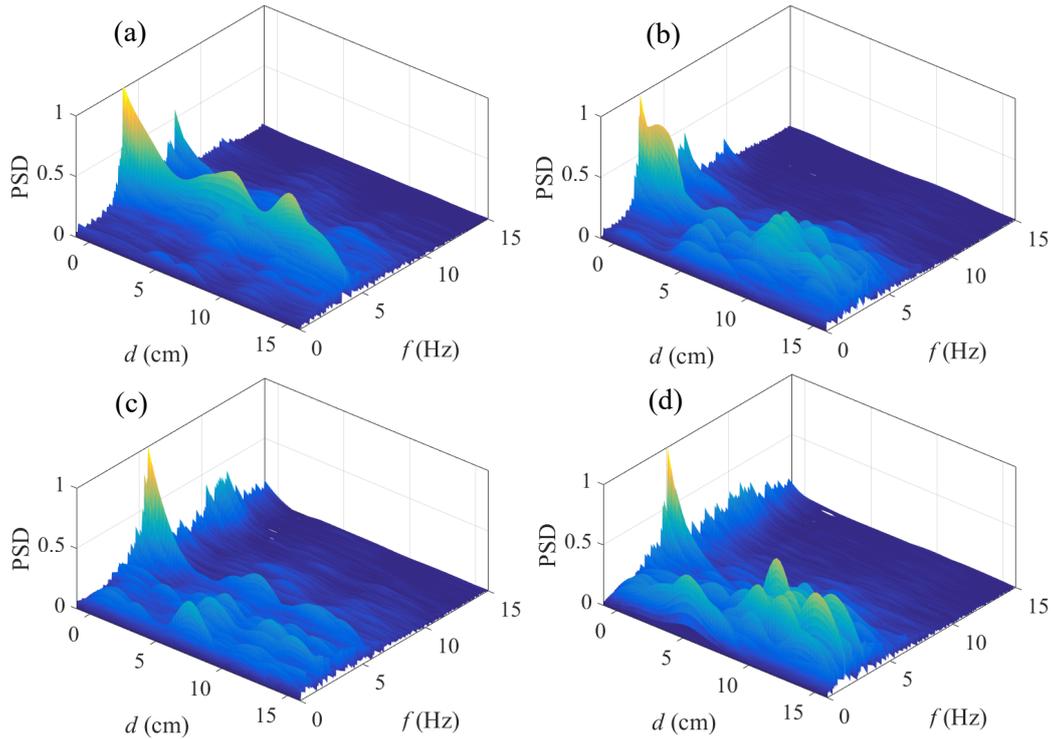


FIGURE 22 – Spectres de puissance de chaque zone interpolés sur la distance dans le milieu poreux pour (a-b) $Q_G = 2, Q_L = 10 \text{ cm}^3.\text{min}^{-1}$ et (c-d) $Q_G = 10, Q_L = 2 \text{ cm}^3.\text{min}^{-1}$ pour (a-c) la mousse NiCr et la mousse carbone (b-d), [8 barreaux].

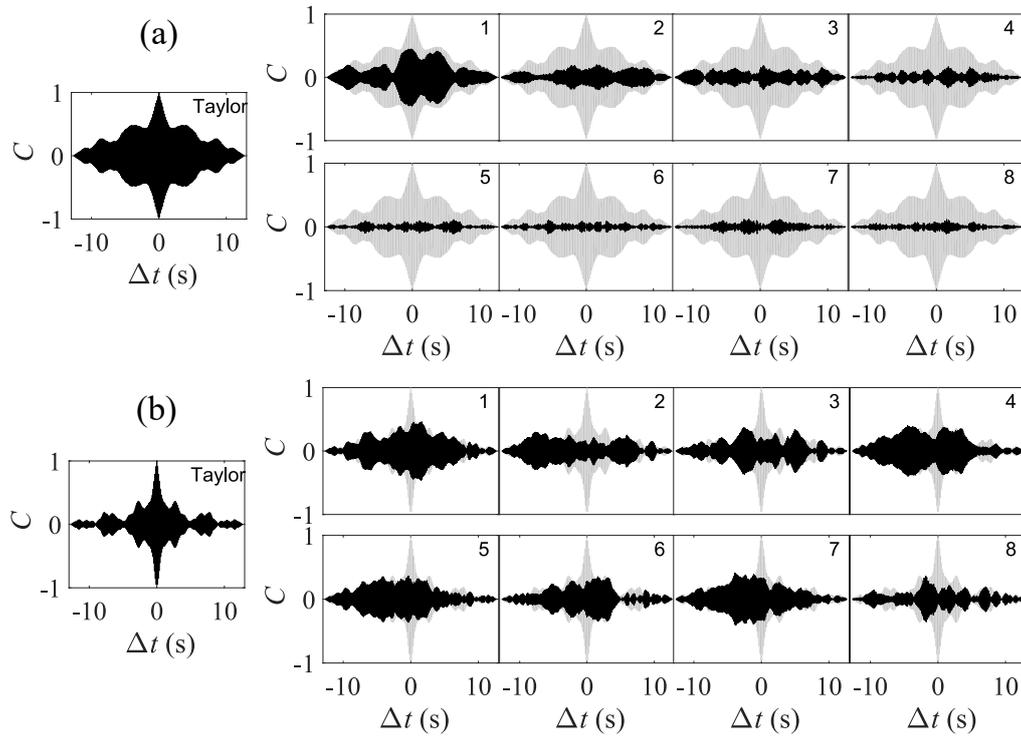


FIGURE 23 – Figures de corrélation entre l'écoulement de Taylor et celui de chaque zone étudiée pour (a) 8 barreaux de mousse carbone et (b) 8 barreaux de mousse NiCr, [$Q_G = Q_L = 6 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$].

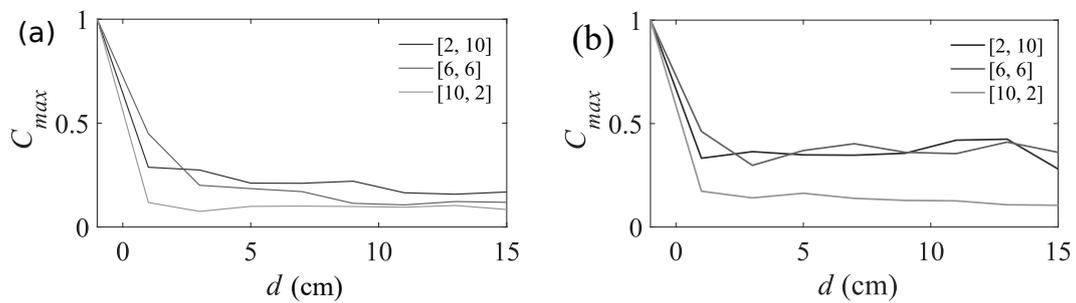


FIGURE 24 – Maximums des corrélations pour un lit (a) de mousse carbone et (b) de mousse NiCr [Q_G, Q_L], [8 barreaux].

6 Conclusion et perspectives

L'hydrodynamique d'un écoulement diphasique gaz-liquide traversant un milieu poreux a été étudiée grâce à deux méthodes : la visualisation directe sur chaque zone (en amont et au milieu de chaque barreau de mousse), et la distribution de temps de séjour. Ces deux approches ont donné des résultats semblables, ce qui les conforte l'une l'autre. Les limites expérimentales de la DTS ont été montrées : l'injection perturbe l'écoulement, et la synchronisation des instants initiaux est d'autant plus importante que le temps de séjour est court. L'étude de la mousse carbone (porosité $\phi = 96\%$, 80 PPI) avec plusieurs débits et différentes longueurs de lit (8, 12 et 16 cm) a montré l'influence du milieu poreux sur un écoulement de Taylor. La rétention liquide augmente dans la mousse pour se stabiliser à partir de quelques centimètres de propagation dans le milieu poreux. Elle ne dépend que des débits de gaz et de liquide en amont : la longueur du milieu poreux n'a pas d'effet notable. La vitesse de l'écoulement liquide est proportionnelle au débit de liquide, et sa dépendance en fonction du nombre de Weber modifié pourrait mener à une façon de classer les différents écoulements.

L'analyse en amont du milieu poreux a montré que la fréquence de l'écoulement de Taylor est bien estimée avec la fréquence théorique calculée, sauf dans le cas de haut débit de gaz : ce serait une manière de différencier les régimes d'écoulements (segmenté, perturbé, chaotique...). La stationnarité du système a permis de mettre en valeur la désorganisation de l'écoulement au fur et à mesure de l'avancée dans le lit avec l'analyse fréquentielle, complétée par l'étude de la corrélation entre la zone de Taylor et celles de la mousse. Pour un régime de Taylor, la fréquence principale reste présente sur quelques centimètres de milieu poreux avant de s'atténuer au profit de basses fréquences non identifiées. Cependant, l'écoulement est désorganisé dès l'entrée de la mousse dans le cas d'un régime modulé. La comparaison avec une mousse métallique en nickel-chrome (porosité $\phi = 89\%$, 40 PPI) a mis en évidence l'influence de la nature du milieu poreux sur l'écoulement qui le traverse. Si la saturation liquide est similaire pour les deux mousses, la désorganisation dans le milieu est très différente. Dans le cas d'un régime de Taylor, la fréquence principale de l'écoulement reste prédominante tout au long de la mousse NiCr. De même l'écoulement dans le lit reste globalement corrélé à celui de Taylor en amont. Cependant la désorganisation est identique pour un régime modulé.

Nous avons mis en valeur un étalement du contenu fréquentiel dans les basses fréquences, mais il serait intéressant de comprendre d'où elles proviennent. Si la fréquence théorique estimée permet bien de retrouver les fréquences en amont mesurées pour un régime de Taylor, les acquisitions à haut débit de gaz (régime modulé) ne rentrent pas dans le modèle. On pourrait alors chercher une autre fréquence théorique qui rende compte de ces écoulements perturbés, pour compléter la distinction entre les différents régimes. La désorganisation plus faible dans la mousse NiCr ouvre un champ d'études avec de nombreux milieux poreux pour appréhender le paramètre principal qui régie cette décorrélation.

Références

- [1] J.-N. Tourvieille, R. Philippe, C. de Bellefon, Milli-channel with metal foams under an applied gas-liquid periodic flow : Flow patterns, residence time distribution and pulsing properties, *Chemical Engineering Science*, Volume **126**, 406-426, 2015.
- [2] V. Blet, Ph. Berne, C. Chaussy, S. Perrin, D. Schweich, Characterization of a packed column using radioactive tracers, *Chemical Engineering Science*, Volume **54**, Issue 1, 91-101, 1999.
- [3] S. Aferka, A. Viva, E. Brunazzi, P. Marchot, M. Crine, D. Toye, Tomographic measurement of liquid hold up and effective interfacial area distributions in a column packed with high performance structured packings, *Chemical Engineering Science*, Volume **66**, Issue 14, 3413-3422, 2011.
- [4] A. Gay, M. Lopez, C. Berndt, M. Séranne, Geological controls on focused fluid flow associated with seafloor seeps in the Lower Congo Basin, , *Marine Geology*, Volume **244**, 68-92, 2007.
- [5] C. Bourry et al., Free gas and gas hydrates from the sea of Marmara, Turkey : Chemical and structural characterization, *Chemical Geology*, Volume **264**, 197-206, 2009.
- [6] A. Babchin, I. Brailovsky, P. Gordon, and G. Sivashinsky, Fingering instability in immiscible displacement, *Physical Review E*, Volume **77**, 026301, 2008.
- [7] R. Holtzman, M. L. Szulczewski, R. Juanes, Capillary Fracturing in Granular Media, *Physical Review Letters*, Volume **108**, 058302, 2012.
- [8] M. T. Kreutzer, F. Kapteijn, J. A. Moulijn, J. J. Heiszwolf, Multiphase monolith reactors : Chemical reaction engineering of segmented flow in microchannels, *Chemical Engineering Science*, Volume **60**, Issue 22, 5895-5916, 2005.
- [9] P. Aussillous, D. Quéré, Quick deposition of a fluid on the wall of a tube, *Physics of Fluids*, Volume **12**, 2367, 2000.
- [10] M. Serres, M.-L. Zanota, R. Philippe, V. Vidal, On the stability of Taylor bubbles inside a confined highly porous medium, *International Journal of Multiphase Flow*, Volume **85**, 157-163, 2016.

Annexes

Tableaux de DTS complet

8 barreaux					6 barreaux					4 barreaux				
Q_G	Q_L	$\tau(s)$	σ^2	$\varepsilon_L(\%)$	Q_G	Q_L	$\tau(s)$	σ^2	$\varepsilon_L(\%)$	Q_G	Q_L	$\tau(s)$	σ^2	$\varepsilon_L(\%)$
2	10	5.45	1.29	1.20	2	10	3.95	0.56	1.13	2	10	0.96	0.07	0.4
6	6	5.56	1.19	0.73	6	6	4.13	0.21	0.71	6	6	2.89	0.79	0.71
10	2	14.7	10.1	0.64	10	2	10.3	1.30	0.59	10	2	7.14	2.04	0.59
										4	4	2.69	0.86	0.44
										8	8	2.03	0.28	0.67

8 barreaux de mousse NiCr				
Q_G	Q_L	$\tau(s)$	σ^2	$\varepsilon_L(\%)$
2	10	4.13	2.2	0.91
6	6	5.08	0.93	0.67
10	2	13.7	3.24	0.60

TABLE 3 – Tableaux des résultats de DTS pour tous les débits (en $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$) et toutes les longueurs de lit sur la mousse carbone et NiCr.

Une idée globale de l'écoulement à travers la mousse solide est donnée en mettant les cartographies de chaque zone côte à côte (Figure 25). La structure locale de la mousse apparaît clairement comme dominante dans le contrôle de l'écoulement, même si le milieu est homogène à plus grande échelle.

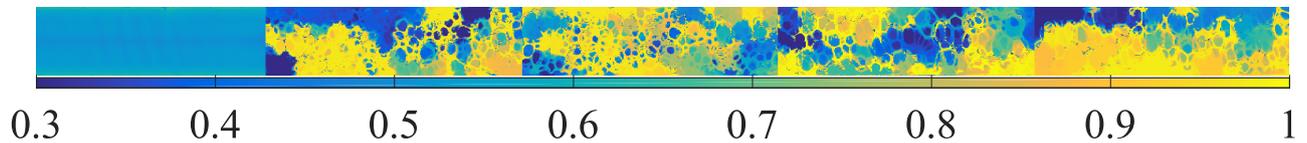


FIGURE 25 – Cartographie de probabilité de passage de liquide en longueur pour $Q_G = Q_L = 8 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ sur 4 barreaux de mousse carbone. Gaz : 0, liquide : 1.

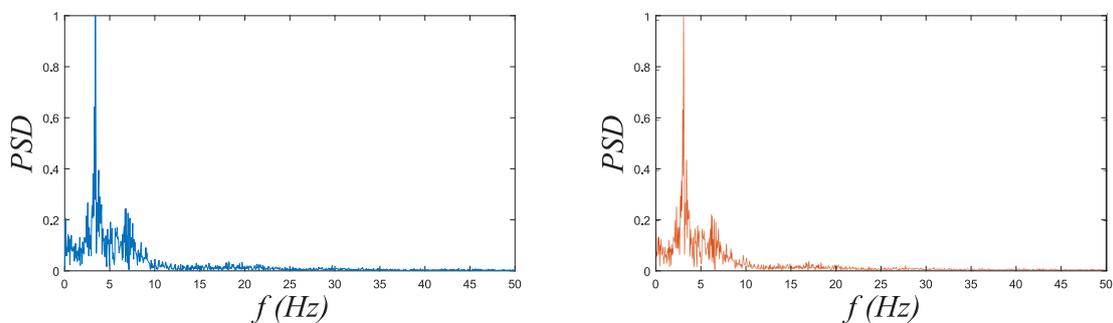


FIGURE 26 – Comparaison des spectres sans (gauche) et avec (droite) interpolation : aucune différence majeure n'est visible [mousse carbone, 2^{ème} barreau sur 8 barreaux, $Q_G = 2, Q_L = 10 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$].

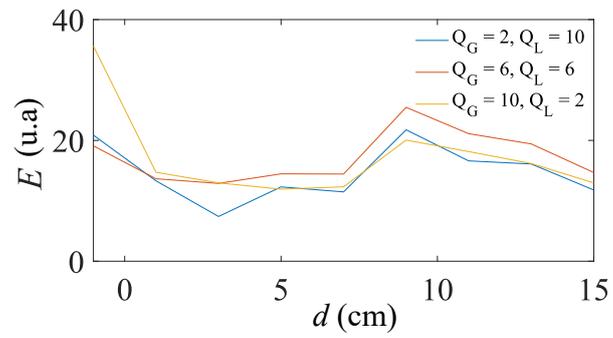


FIGURE 27 – Énergie de l'écoulement calculée avec la formule de Parseval en fonction de la distance parcourue dans le milieu poreux [mousse carbone, 8 barreaux].