

Écoulement de mousses dans des modèles de milieux poreux

V. HOURTANÉ^a, H. BODIGUEL^a, A. COLIN^a

a. Laboratoire du Futur (LOF), 178 avenue du Dr Schweitzer 33600 Pessac

Résumé :

Afin de modéliser l'écoulement de mousses en milieux poreux, nous proposons une approche microfluidique permettant une observation directe d'un écoulement de bulles dans un micromodèle de milieux poreux. Des puces hydrophiles ont été créées permettant à la fois de générer des trains de bulles de taille et de fraction volumique contrôlées et d'injecter ces bulles dans un réseau de canaux aléatoires. Lorsque la taille des bulles est de l'ordre de la largeur des canaux, et pour des fractions volumiques de l'ordre de 0.5, nous observons la formation de chemins préférentiels : l'écoulement est concentré dans une petite fraction des canaux. Le nombre de ces chemins augmente lorsque les débits augmentent, ce qui semble compatible avec l'existence d'un seuil pour l'écoulement à l'échelle locale.

Abstract :

To understand the flow of foams in porous media, we propose a microfluidic approach allowing a direct observation of the flow of bubbles in a micromodel of porous media. Hydrophilic chips are used to generate a train of bubbles whose volume fraction and size are controlled and to inject these bubbles in a network of random channels. When the size of the bubbles is around the width of the channels and the volume fraction is around 0.5, we observe the formation of preferential paths : the flow is concentrated in a small part of the porous media. The number of these paths increases when the flow rates increase which seems compatible with the existence of a threshold for the flow locally.

Mots clefs : bulles, microfluidique, milieu poreux, mousses, écoulement

1 Introduction

Dans le cadre de la récupération assistée du pétrole, différentes techniques sont utilisées afin d'augmenter la production. Une des solutions chimiques consiste à injecter de la mousse dans le milieu poreux. Dans certaines conditions, la mousse permet de diminuer fortement la mobilité de la phase gazeuse, et ainsi de mieux balayer le réservoir. Les mécanismes contrôlant la mobilité de la mousse et son interaction avec les hétérogénéités du milieu restent cependant mal compris, notamment à cause du nombre de phénomènes mis en jeu simultanément : formation, coalescence, transport, répartition... Un des paramètres clés dans l'injection de mousse dans les milieux poreux est la viscosité effective du gaz : il faut augmenter cette viscosité afin d'éviter les phénomènes de digitation visqueuse et d'accéder aux plus petits pores. Il a été montré qu'il existe deux régimes de mousses régis par des mécanismes différents : un régime de haute qualité, où la fraction volumique en gaz est très importante, est gouverné par une compétition entre la dynamique de génération des bulles et la coalescence des bulles ; tandis que le régime de basse qualité, faible fraction volumique de gaz, est régi par les interactions entre chaque bulle et entre les bulles et les parois [1]. Des observations directes à l'échelle du pore ou d'un réseau de pore semblent nécessaires pour mieux décrire les écoulements de mousse en milieu poreux. Dans la littérature, plusieurs expressions semi-empiriques peuvent être trouvées pour la viscosité effective dans les milieux poreux comme le modèle de Bretheton [2] sur l'écoulement d'une bulle dans un tube, qui a été par la suite étendu à un train de bulles par d'autres auteurs [3]. Cependant ces théories ne sont plus valables dans le cas de mousses sèches. De plus, elles ne prennent pas en compte la géométrie des

pores qui a une forte influence sur la mobilité des mousses. En effet, si on considère un tube de section non uniforme, alors il apparait un seuil en pression en dessous duquel la mousse ne s'écoule pas et une valeur critique d'écart de pression au-dessus de laquelle les lamelles vont se casser [4].

Nous proposons d'étudier, l'écoulement des mousses dans des milieux poreux modèles. Il nous faut pour cela pouvoir contrôler d'une part la géométrie et les dimensions de chaque canal composant le modèle de milieu poreux, et d'autre part les différents paramètres des bulles générées (taille, concentration, vitesse). Les outils microfluidiques permettent de créer des géométries complexes dont les dimensions sont contrôlées au micron près. Selon le matériau utilisé, les puces microfluidiques ont des propriétés physico-chimiques différentes. Dans le cadre de nos travaux, nous allons travailler avec un système de bulles d'air dans de l'eau. Il nous faut donc un matériau hydrophile. Pour cela, nous avons choisi de travailler avec des puces microfluidiques en NOA [5]. Dans la plupart des dispositifs expérimentaux utilisés en microfluidique pour générer des bulles ou des gouttes, la taille des bulles est liée aux débits des fluides et donc à leur vitesse. Afin d'obtenir des tailles indépendantes des débits, nous utilisons un dispositif développé par Maloggi *et al* pour des générations de gouttes, [8] et qui repose sur une géométrie tridimensionnelle.

Tout d'abord, nous détaillerons le protocole permettant de fabriquer des puces microfluidiques en NOA puis nous présenterons nos résultats sur la génération contrôlée de bulles d'air et sur l'écoulement des bulles dans notre modèle de milieu poreux.

2 Fabrication de puces microfluidiques en NOA

Pour étudier un système de bulles d'air dans de l'eau, nous avons besoin de travailler avec des puces transparentes, pour permettre l'observation, et hydrophiles. Nous avons choisi d'utiliser des puces en NOA81 qui est une résine réticulable aux UVs [5]. Afin de pouvoir fabriquer des puces en NOA, il est nécessaire de réaliser au préalable un tampon de notre géométrie de canaux.

Il faut tout d'abord réaliser un moule de notre géométrie. Pour cela, nous utilisons les techniques de photolithographie, qui sont déjà bien connues. Sur un wafer en silicium, une couche de résine négative photosensible SU8 est déposée grâce à une tournette. Les paramètres de spin-coating vont déterminer l'épaisseur de la couche de résine déposée et donc l'épaisseur de nos canaux. Ensuite cette résine est cuite une première fois puis insolée aux UVs pendant quelques secondes à travers un masque sur lequel est représenté notre géométrie de canaux. La résine se trouvant au niveau des zones transparentes du masque va réticuler. Une seconde cuisson est nécessaire pour finir la réticulation. Pour chaque épaisseur différente, le protocole de lithographie va être répéter et nécessite une étape supplémentaire d'alignement des motifs lors de l'insolation aux UV.

A partir de ce moule, nous fabriquons un tampon en PDMS de nos canaux. Le PDMS est versé sur le moule puis placé à l'étuve. Après la cuisson, on démoule le PDMS du wafer. On obtient alors notre tampon en PDMS sur lequel figure notre géométrie de canaux.

Quelques gouttes de NOA sont versées sur une lamelle de verre puis le tampon en PDMS est posé dessus. L'ensemble réticule aux UVs une première fois puis le tampon est retiré. On obtient alors notre motif de canaux en NOA qui n'est pas complètement réticulée en surface afin de permettre le collage avec une lame de verre pour fermer la puce. La lame de verre est déposée sur le motif en NOA puis est insolé aux UVs une seconde fois afin de finir la réticulation et le collage.

3 Écoulement de mousses dans un modèle de milieu poreux

Le dispositif microfluidique se compose de deux parties, la première servant à générer la mousse, la deuxième étant un réseau de canaux aléatoire qui constitue le micromodèle de milieux poreux.

3.1 Génération de bulles d'air dans de l'eau

Dans la littérature, il existe différentes géométries pour générer des gouttes ou des bulles[6][7]. Nous avons choisi le système de génération schématisé sur la figure 1 notamment car il permet du moins en liquide-liquide de générer des gouttes dont le diamètre est indépendant des débits. Il consiste en une co-injection d'air et d'eau dans une géométrie tridimensionnelle où le jet du fluide d'air non-mouillant se déstabilise dans un réservoir de plus grande dimensions sous l'effet des forces de surface [8] (voir la figure 1 pour le détail des dimensions utilisées). L'écoulement d'eau est contrôlé en débit par l'intermédiaire d'un pousse-seringue (Cetoni Nemesys). L'air est quant à lui contrôlé à pression imposée (contrôleur de pression Fluigent), dans une gamme allant de 50 à 1000 mbar. Le débit d'air correspondant est déterminé par l'intermédiaire de la mesure par analyse d'image de la taille et de la fréquence des bulles. La phase aqueuse est une solution de Sodium Dodecyl Sulfate à 6g/L, qui permet d'assurer un mouillage total de l'eau sur la NOA et d'éviter la coalescence des bulles. La solution obtenue présente une tension de surface égale à $\gamma = 38$ mN/m. Enfin, ce dispositif de génération est complété en aval par l'ajout d'une jonction avec deux canaux de petites dimensions contrôlés en débit permettant la concentration ou la dilution des bulles.

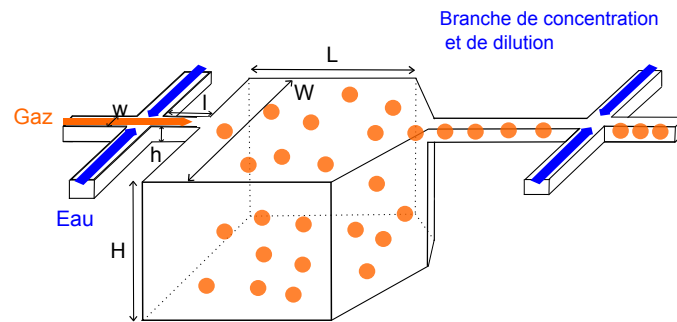


FIGURE 1 – Système de génération des bulles. $H = 150\mu\text{m}$, $L = 500\mu\text{m}$, $W = 500\mu\text{m}$, $h = 15\mu\text{m}$, $l = 50\mu\text{m}$, $w = 50\mu\text{m}$

En variant le débit d'eau et la pression de l'air, nous obtenons un domaine de fonctionnement avec une génération stable pour des débits compris entre 100 et 800 $\mu\text{L}/\text{h}$, c'est à dire des nombre capillaires de l'ordre de $Ca = 10^{-3}$, où $Ca = \eta V/\gamma$, V étant la vitesse dans le jet, et η la viscosité de l'eau. Pour des débits plus faibles, la génération n'est pas stable, et pour des débits plus grands, le jet ne se déstabilise plus. La taille des bulles est reportée en fonctions des débits d'eau et de gaz sur la figure 2. On obtient des bulles dont le diamètre est de l'ordre de 5 à 10 fois la hauteur du jet précédent la déstabilisation. La taille est croissante avec le débit d'air et décroissante le débit d'eau.

Ce système de génération a été initialement développé par Mallogi *et al.* pour produire des gouttes de liquides et non des bulles d'air [8]. En liquide-liquide, le diamètre des gouttes ne dépend pas des différents débits et vaut 2 à 3 fois la hauteur du jet [8]. Les résultats présentés sur la figure 1 montre que cette conclusion ne s'applique pas aux gaz, car nous trouvons non seulement des tailles beaucoup plus grosses, mais encore des tailles qui dépendent des débits. Des approfondissements tant théoriques qu'expérimentaux semblent nécessaires afin de comprendre cette différence entre génération de bulles et de gouttes.

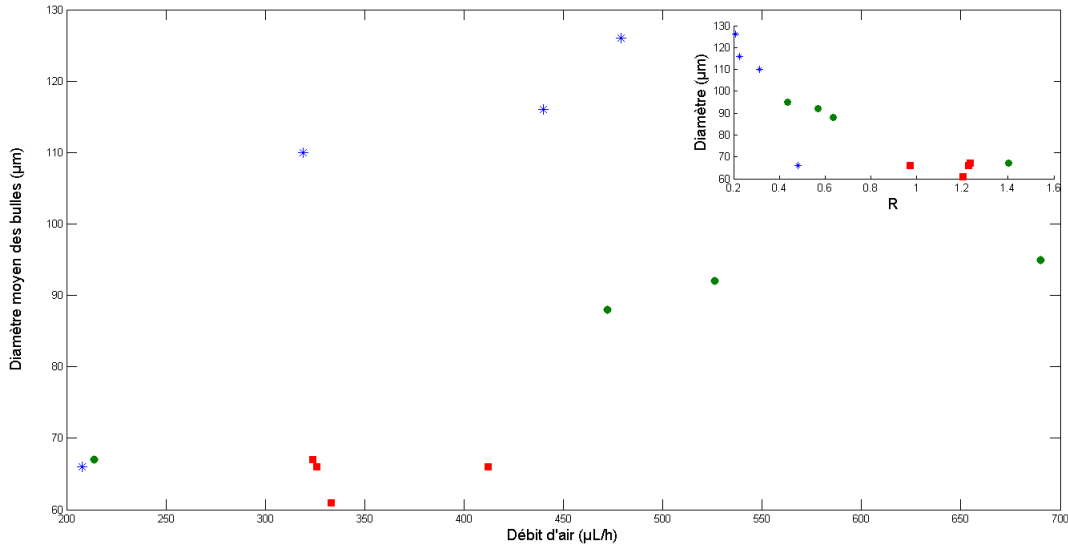


FIGURE 2 – Taille des bulles en fonction du débit d'air pour des débits d'eau $Q_{\text{eau}} = 100 \mu\text{L}/h$ (étoiles), $Q_{\text{eau}} = 300 \mu\text{L}/h$ (ronds) et $Q_{\text{eau}} = 400 \mu\text{L}/h$ (carrés). En insert est représentée l'évolution de la taille des bulles en fonction du rapport $R = Q_{\text{eau}}/Q_{\text{air}}$.

3.2 Écoulement des bulles d'air dans un modèle de milieu poreux

Sur le même dispositif microfluidique est réalisé en aval un réseau 2D de canaux de tailles et d'orientations aléatoires qui constitue un modèle de milieux poreux (voir référence [9] pour une description de la méthode de génération). Une arborescence est réalisée entre le système de génération et le micromodèle afin d'assurer une bonne répartition spatiale des bulles. La largeur moyenne des canaux est de $50 \mu\text{m}$ et la hauteur de $50 \mu\text{m}$, la taille des canaux est donc de l'ordre de grandeur de la taille des bulles. Le domaine poreux fait $1 \times 1 \text{ cm}$, et possède une longueur de corrélation de $125 \mu\text{m}$.

Nous nous sommes focalisés sur des mousses semi-concentrées (de fraction volumique de l'ordre de 50%) dont la vitesse moyenne est de quelques mm/s. La figure 3 montre un exemple d'image obtenue. On constate que le réseau est intégralement envahi par des bulles. L'observation directe du déplacement des bulles montre que l'écoulement est très hétérogène, mais qu'il n'y a pas d'événements de coalescence ni de fragmentation des bulles. Il apparaît que les bulles s'écoulent dans certains canaux et sont immobilisées dans d'autres. On observe également des fluctuations assez importantes sur des canaux à la limite du blocage. Pour certains de ces canaux, en augmentant les débits il est possible de déloger les bulles piégées.

Afin de mettre en évidence les chemins préférentiels qui se forment, nous avons soustrait deux à deux les images successives acquises à 100 Hz avant de moyenner ces différences sur 7s. Cette procédure permet de différencier qualitativement les zones mobiles des zones immobiles. La figure 3 montre un exemple de résultat obtenu. On observe ainsi un nombre assez limité de chemins préférentiels, dans lesquels se concentre la majorité du débit. De plus, il apparaît que l'écoulement dans l'arborescence d'injection n'est pas homogène. Cependant, la présence d'une grande piscine à la sortie des pattes d'injection permet de découpler l'influence d'un écoulement non homogène dans les pattes d'injection de l'écoulement dans le milieu poreux. En effet, l'observation des films montrent que ceux-ci ne sont pas créés par l'arborescence d'injection, car les bulles circulent librement dans la bande séparant l'arborescence du réseau de canaux.

La figure 4 montre l'évolution des chemins préférentiels observés en fonction des débits d'eau et de gaz, pour des fractions volumiques de l'ordre de 50%. Nous constatons alors que plus les débits d'eau

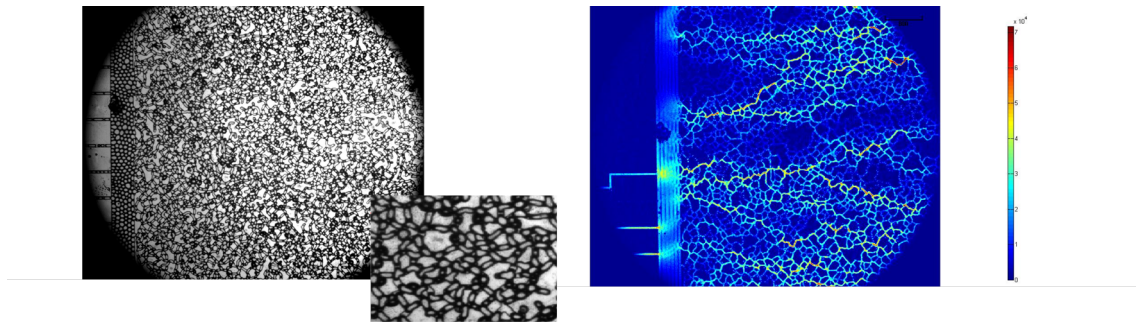


FIGURE 3 – $Q_{\text{eau}} = 400\mu\text{L}/h$ et $Q_{\text{air}} = 326\mu\text{L}/h$, fraction volumique=45%. a)Écoulement des bulles d'air dans le modèle de milieu poreux. b)Illustration quantitative des chemins préférentiels : les couleurs les plus brillantes correspondent aux vitesses les plus élevées.

et d'air sont élevés, plus il y a de canaux parcourus par les bulles. De plus, les hétérogénéités de vitesse semblent s'amoinrir. Ces résultats doivent être considérés avec précaution car la taille des bulles varie avec les débits et la fraction volumique. Il n'est pas possible à partir de ces résultats de conclure quant à l'influence de la taille des bulles sur leur écoulement dans le milieu poreux. De nouvelles expériences sont en cours afin de faire varier indépendamment les différents paramètres : débits, taille des bulles et fraction volumique.

Une des explications possibles pour l'apparition des chemins préférentiels est que la taille des bulles étant de l'ordre de grandeur des canaux, elles doivent se déformer pour pouvoir avancer. Par conséquent les relations locales débits/pression sont vraisemblablement non-linéaires et devraient présenter un seuil en pression, de l'ordre de la pression capillaire. À bas débit, la différence de pression globale est faible et reste de l'ordre de cette pression seuil. L'hétérogénéité des tailles de pores conduit à ce qu'une partie seulement des canaux présente une différence de pression supérieure au seuil d'écoulement, créant donc des chemins préférentiels. À plus haut débit, la pression augmente et dépasse le seuil dans de plus en plus de canaux. Ce mécanisme demanderait à être étudié plus en détail afin de pouvoir discuter plus quantitativement les résultats.

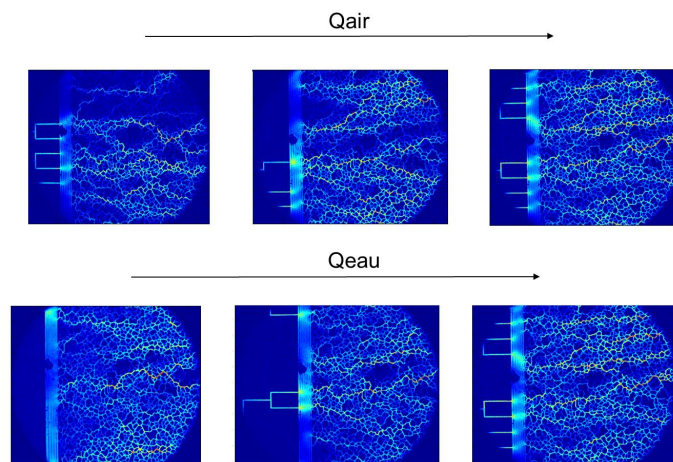


FIGURE 4 – Évolution des chemins préférentiels en fonction des débits d'eau et d'air. Pour des nombres capillaires de l'ordre de $Ca = 10^{-5}$. A débit d'eau constant $Q_{\text{eau}} = 400\mu\text{L}/h$, le débit d'air est de 300, 340 et $412\mu\text{L}/h$ (la fraction volumique est comprise entre 45 et 50%). A débit d'air fixé $Q_{\text{air}} = 450\mu\text{L}/h$, le débit d'eau vaut 100, 300 et $400\mu\text{L}/h$ (la fraction volumique est comprise entre 53 et 82%).

4 Conclusions

En utilisant les techniques de microfluidie, nous avons pu générer un train de bulles stables en contrôlant leur taille et leur vitesse grâce à la géométrie du système et aux débits d'eau et d'air. Ces bulles sont ensuite injectées dans un modèle de milieu poreux. L'observation de l'écoulement de mousses semi-concentrées dans notre modèle de milieu poreux a permis de mettre en évidence la présence de chemins préférentiels dans lesquels s'écoule la majorité des bulles et de zones bouchées où les bulles restent immobiles mais peuvent parfois avancer quand le nombre capillaire augmente. Une étude plus quantitative des chemins préférentiels en fonction des différents paramètres que sont la fraction volumique et le débit total constitue la perspective de ce travail et est à actuellement en cours de réalisation. Par ailleurs, afin de valider le mécanisme de formation de ces chemins préférentiels, nous envisageons de déterminer les lois régissant l'écoulement à une jonction ainsi que la mobilité effective des mousses dans un simple canal. Cette étude à l'échelle du pore sera par la suite utilisée pour comprendre les phénomènes se produisant à l'échelle du milieu poreux modèle.

Références

- [1] Miodrag Bogdanovic, Rahul N. Gajbhiye, Seung Ihl Kam. 2009 Experimental study of foam flow in horizontal pipes : two flow regimes and its implication. *Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering aspects* **344** 56-71
- [2] F.P. Bretherton 1961 The Motion of Long Bubbles in Tubes. *Journal of Fluid Mechanic* **10** 166
- [3] Hirasaki GJ, Lawson JB 1985 Mechanisms of Foam Flow in Porous-Media - Apparent Viscosity in Smooth Capillaries. *Society of Petroleum Engineers Journal* 25(2) **176-90**
- [4] KG Kornev, AV Neimark, AN Rozhkov 1999 Foam in porous media : thermodynamic and hydrodynamic peculiarities. *Advances in Colloid and Science* **82(1-3)** 127-187
- [5] Bertrand Levaché, Ammar Azioune, Maurice Bourel, Vincent Studer and Denis Bartolot 2012 Engineering the surface properties of microfluidic stickers. *Lab on a Chip* **12** 3028-3031
- [6] I. Kobayashi, et al. 2005 Liquid-liquid micro-dispersion in a double-pore T-shaped microfluidic device. *Langmuir* **21** 7629
- [7] M. Stoffel et al. 2012 Bubble production mechanism in a microfluidic foam generator. *Physical Review Letters* **108** 198302
- [8] F. Malloggi, N. Pannacci, R. Attia, F. Monti, P. Mary, H. Willaime, P. Tabeling, B. Cabane and P. Poncet 2010 Monodisperse Colloids Synthesized with Nanofluidic Technology. *Langmuir* **26** 2369-2373
- [9] M. Romano, M. Chabert, A. Cuenca and H. Bodiguel 2011 Strong influence of geometrical heterogeneity on drainage in porous media. *Phys. Rev. E* **84** 065302