

Ecoulements diphasiques à très bas nombre capillaire dans des micromodèles réguliers

C. Cottin^a, H. Bodiguel^a, M. Morvan^a, A. Colin^a

^aLab. LOF, Univ. Bordeaux1/CNRS/Rhodia, 178 av. du Dr Schweitzer, 36008 Pessac Cedex.

Key words: écoulements diphasique, micromodèles de milieux poreux, mouillage

A cause de ses applications importantes pour l'industrie pétrolière, les écoulements diphasiques en milieux poreux ont été l'objet de très nombreuses études depuis près d'un demi siècle. Parmi elles, des approches expérimentales permettant la visualisation des écoulements, comme celles de Lenormand (voir par exemple [1]), ont permis des avancées significatives dans la description des morphologies et des mécanismes de drainage en fonction des viscosités des fluides et de la mouillabilité du milieu.

A très bas nombre capillaire, la pression capillaire domine toutes les différences de pressions d'origine visqueuse, et gouverne la progression des ménisques. Il en résulte une morphologie de type digitation capillaire, si le fluide envahisseur ne mouille pas le milieu poreux. On peut rendre compte de cette digitation en postulant qu'à chaque noeud d'un réseau de pores, le fluide envahisseur va progresser dans le pore le plus grand [1]. Ce modèle simple permet à des simulations de bien rendre compte de ce régime.

Aujourd'hui, grâce à des techniques de fabrication classiques en microfluidique, on peut créer des micromodèles de géométrie modifiable à souhait et avec une très bonne précision [2], ce qui permet de compléter les études antérieures. Nous nous sommes intéressés en particulier à des réseaux de canaux réguliers (voir figure 1) au sein desquels les hétérogénéités de tailles sont très faibles ($< 1\%$). Ces derniers permettent donc de poser la question des mécanismes responsables de la digitation capillaire. Ces réseaux sont fabriqués en verre, ce qui permet une bonne rigidité mécanique et un traitement chimique des surfaces permettant de passer progressivement d'un milieu hydrophile à un milieu hydrophobe. Dans cette communication, nous nous limiterons à un système où l'huile est en mouillage total sur la surface en présence d'eau.

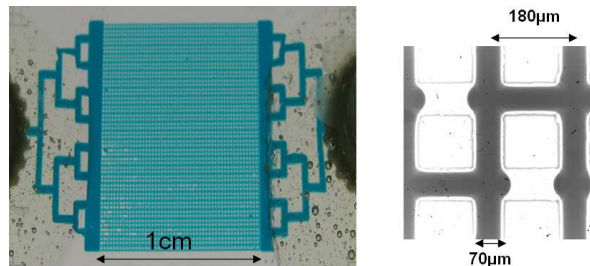


FIG. 1: Gauche : Photographie d'un micromodèle en verre rempli d'eau colorée. Le micromodèle est constitué d'un réseau de canaux réguliers de section $70 \times 30 \mu\text{m}$ espacés de $180 \mu\text{m}$. Il se situe entre deux arborescences de plus grande épaisseur ($100 \mu\text{m}$) qui permettent d'imposer un gradient de pression unidirectionnel. Droite : image microscope d'une petite partie du micromodèle, où on distingue des ménisques entre de l'eau colorée et du dodécane. Le verre est traité par par de l'octadecyltrichlorosilane. Il y a mouillage total du dodécane sur cette surface en présence d'eau.

Nous avons réalisé dans ces micromodèles des expériences de drainage d'une huile (dodécane) par des mélanges eau/glycerol. Les observations confirment la très grande différence entre le drainage dans un milieu hydrophile et dans un milieu hydrophobe : un drainage complet est observé lorsque le verre est préalablement traité hydrophile, et une digitation capillaire lorsqu'il est traité hydrophobe. Ce dernier cas revêt un intérêt supplémentaire à cause de la très faible polydispersité des pores.

Deux régimes extrêmes sont observés en fonction du nombre capillaire et sont illustrés sur la figure 2. Pour des nombres capillaires élevés ($Ca > 10^{-4}$), un front régulier se propage, menant à des saturations

résiduelles en huile faibles (0.1-0.2). Pour de très faibles nombres capillaires ($Ca < 5 \cdot 10^{-6}$), la progression de l'eau se produit à l'échelle d'un canal. Seuls quelques ménisques avancent simultanément, et dans des directions et sens décorrélés de ceux du gradient de pression. A la percolation, la saturation en huile est importante (0.6-0.9). Il a été vérifié que le rapport des viscosités des deux fluides ne modifiait pas ces résultats.

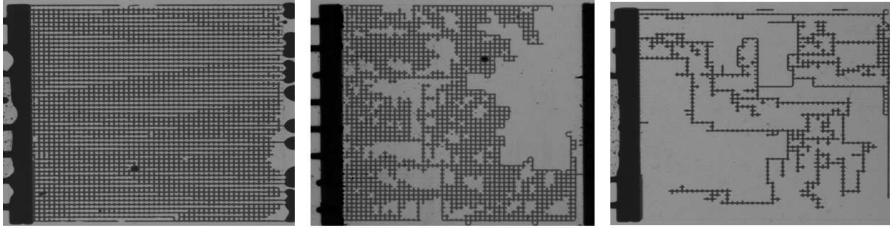


FIG. 2: Images obtenues après drainage du dodécane (invisible sur la figure) par de l'eau colorée (en noir sur la figure) à débit imposé par un pousse seringue. De gauche à droites, les nombres capillaires valent respectivement : $5.0 \cdot 10^{-6}$, $2.4 \cdot 10^{-5}$, $3.0 \cdot 10^{-4}$. Pour le système considéré, la tension interfaciale vaut 26 mN/m, et les viscosités 0.89 et 1.4 mPa.s., pour l'eau et le dodécane respectivement.

Par analyse d'image et en utilisant la géométrie simple du réseau de canaux, nous avons caractérisé quantitativement à ces régimes, en déterminant les vitesses locales d'avancées des ménisques. Les résultats mettent en évidence de grandes différences pour ces différents régimes. Pour le régime de digitation capillaire, les vitesses des ménisques présentent de très grandes fluctuations et s'étalent sur 4 ordres de grandeurs. Ces vitesses sont beaucoup plus grandes que la vitesse moyenne. En effet, dans ce régime, la plupart des ménisques sont immobiles, et seuls quelques-uns progressent simultanément. Le régime de drainage visqueux à haut capillaire exhibe quant à lui des vitesses de ménisque plus homogènes, et proches de la vitesse moyenne fixée par le nombre capillaire.

Les techniques de microfabrication permettent de changer facilement la géométrie afin d'apporter des éléments de compréhension sur le régime de digitation capillaire. La figure 3 illustre une expérience de drainage réalisée dans une arborescence de canaux. Dans une telle géométrie, le nombre capillaire diminue à chaque jonction. Alors que la progression est symétrique pour $Ca > 10^{-5}$, la symétrie se brise systématiquement et aléatoirement pour des nombres capillaires plus faibles. On vérifie ainsi que ce n'est pas la géométrie des canaux qui est responsable de cette brisure de symétrie.

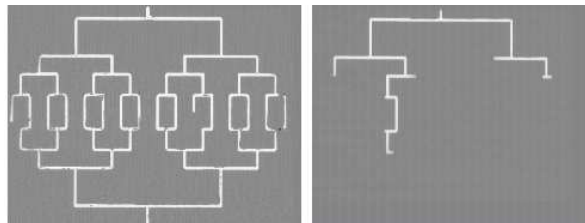


FIG. 3: Expérience de drainage du dodécane par de l'eau coloré (en blanc sur la figure), dans une arborescence de canaux d'épaisseur $30 \mu\text{m}$ et de largeur $80 \mu\text{m}$. Gauche : image obtenue à la fin du drainage pour un débit de $250 \mu\text{L/h}$. Droite : image obtenue pendant le drainage avec un débit de $7.5 \mu\text{L/h}$.

Ces études appellent à des approfondissements sur la dynamique de ménisques en mouillage total qui sont actuellement en cours de réalisation. Elles constituent également un point de départ pour des expériences similaires mettant en jeu des fluides complexes, aux propriétés rhéologiques non-newtonniennes.

Références

- [1] R. Lenormand, Liquids in porous media, J. Phys. : Condens. Matter, 2, SA79 (1990)
- [2] V. Berejnov, N. Djilali and D. Sinton, Lab-on-chip methodologies for the study of transport in porous media : energy applications, Lab on a Chip, 8, 689 (2008)