

Écoulement de suspensions denses en milieux poreux modèles

Y. SOUMANE ^a, A. NAILLON ^b, H. BODIGUEL ^c

Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, LRP, Grenoble, France

a. E-mail : youness.soumane@univ-grenoble-alpes.fr

b. E-mail : antoine.naillon@univ-grenoble-alpes.fr

c. E-mail : hugues.bodiguel@univ-grenoble-alpes.fr

Résumé :

Cette étude cherche à décrire le phénomène de colmatage des milieux poreux à travers une approche micromodèle. Il s'agit d'étudier les écoulements de suspensions denses qui conduisent à des accumulations de particules dans certaines régions des milieux étudiés. Dans un premier temps, nous analyserons ce phénomène pour des géométries simplifiées à l'échelle de quelques pores individuels puis on s'intéressera à des modèles imitant le mieux possible la structure d'un milieu poreux. Pour ce faire, on a utilisé des techniques de la microfluidique pour la fabrication des milieux modèles transparents bidimensionnels et on a suivi la concentration en particules grâce à la microscopie en lumière directe .

Qualitativement, le déclenchement du colmatage se produit au niveau des régions situées en amont de constriction importantes, ou de zones où l'écoulement est relativement lent. Des études plus quantitatives sont actuellement en cours afin de corrélérer la dynamique de colmatage avec les caractéristiques locales du milieu.

Abstract :

This paper seeks to describe the phenomenon of clogging in porous media using a micromodel approach. It is a question of studying dense suspension flows which induce accumulations of particles in certain regions of the studied media. First, we will analyze this phenomenon for simplified geometries on the scale of some individual pores then we will be interested in models imitating as well as possible the structure of a porous media. Transparent two dimensional models of porous media were fabricated using microfluidics techniques and to track the particle concentration, we used the light microscopy.

Qualitatively, the triggering of clogging occurs upstream of significant constrictions, or areas where the flow is relatively slow. More quantitative studies are currently underway to correlate clogging dynamics with local environmental characteristics.

Mots clefs : Colmatage, milieux poreux, suspensions, microfluidique, rhéologie

1 Introduction

Les suspensions denses de particules solides sont impliquées dans nombreux domaines. Dans les milieux poreux la migration de particules fines est d'une grande importance pour de nombreuses applications comme les écoulements dans les systèmes biologiques [1] et la filtration [2]. Lorsque l'écoulement de suspensions denses se passe dans un milieu poreux, ces particules peuvent s'accumuler dans certaines régions et former des bouchons. Ces accumulations réduisent la perméabilité des milieux poreux à l'écoulement, ce qui influe négativement sur plusieurs applications, telles que l'extraction de l'eau et du pétrole, la production de sable et la production de gaz dans le domaine du génie pétrolier.

Les études récentes de ce phénomène de colmatage s'intéressent plus spécifiquement à l'analyse des bouchons à l'échelle du pore. Elles constituent un point de départ dans la compréhension de ce phénomène, à travers des modèles de pores et des structures imitant un support poreux tels que des simples constriction [3]. D'autres études se sont intéressées à l'étude du phénomène à l'échelle du milieu poreux mais dans des milieux réguliers pour simplifier l'analyse [4].

Dans ce travail, nous cherchons à étendre ces résultats à des milieux désordonnés, pour lesquels on s'attend à un couplage entre hétérogénéités d'écoulement et de concentration, lesquelles pouvant conduire à un colmatage local du milieu. Nous utilisons pour cela des milieux poreux à deux dimensions, réalisés par des techniques microfluidiques à partir d'un design désordonné. La transparence nous permet d'imager l'écoulement de la suspension, et de quantifier la concentration en particule localement. En parallèle de ces géométries complexes, nous étudions également des motifs plus simples, telles que des obstacles, considérés comme des éléments de base d'un milieu poreux.

2 Procédure expérimentale

2.1 Conception des réseaux poreux

2.1.1 Géométrie imitant un milieu poreux

Pour se rapprocher au mieux de la réalité du phénomène de colmatage dans les milieux poreux, tout en restant dans des modèles à deux dimensions, un algorithme a été utilisé pour générer de façon aléatoire les plots qui représentent la partie solide du milieu poreux.

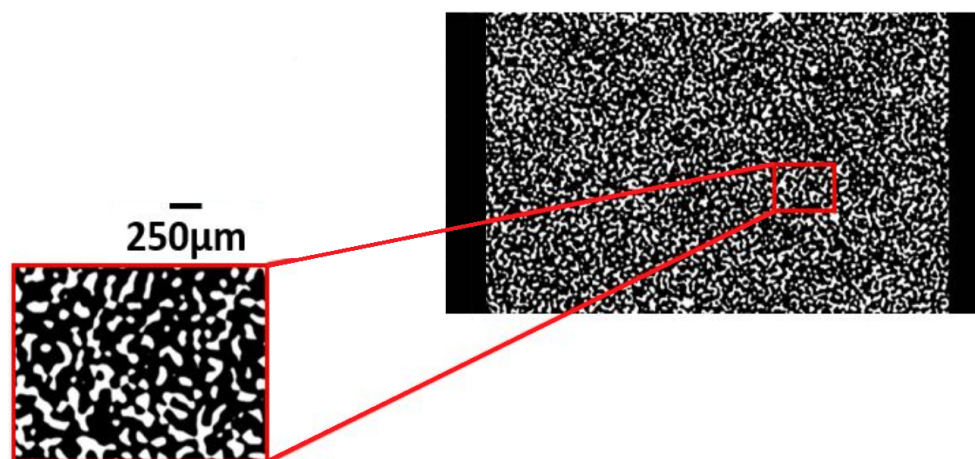


FIGURE 1 – Masque du milieu poreux modèle utilisé. En noir sont représentées les zones de circulations du fluide et des particules. En blanc sont représentés les murs et les plots.

Ce programme permet de choisir un ensemble de paramètres essentiels dans la conception du milieu poreux comme la porosité du milieu, et la longueur de corrélation. Le principe consiste à tirer des nombres aléatoires sur chaque point de l'espace de Fourier, de les pondérer par une Gaussienne centrée sur le vecteur d'onde correspondant à la longueur de corrélation souhaitée avant de réaliser la transformée de Fourier inverse et de binariser l'image obtenue. Le modèle étudié dans ce manuscrit est présenté dans la figure 1. La taille des canaux est autour de $300\mu m$ et la hauteur est de $215\mu m$.

2.1.2 Géométries simples

Les géométries simples servent à simplifier l'étude du phénomène de colmatage, et permettent de mieux comprendre le comportement des particules près d'un obstacle, d'une constriction ou d'une bifurcation. Dans ce papier, nous avons choisi d'étudier deux formes simplifiées présentées sur la figure 2.

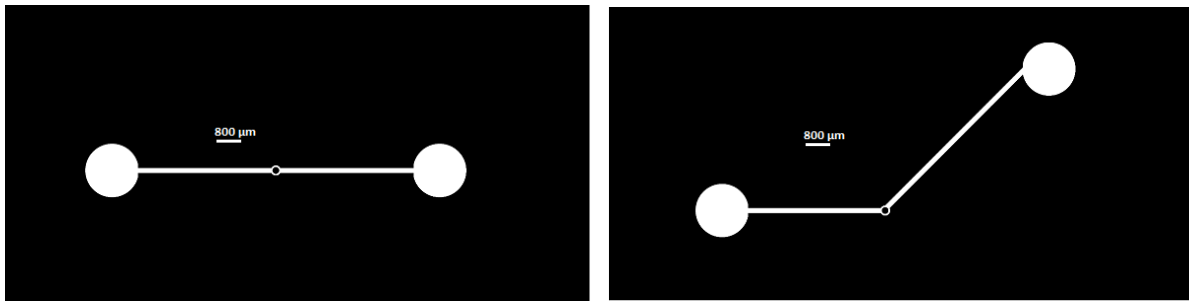


FIGURE 2 – Géométries simples utilisées : (de gauche à droite), obstacle au milieu d'un canal rectiligne ; même obstacle mais situé sur un coude ; le trait d'échelle sur les figures fait 800 micromètres

2.2 Fabrication des micromodèles

Les micromodèles utilisés sont fabriqués en PDMS par moulage.

Nous utilisons une photolithographie douce pour fabriquer les moules de nos circuits microfluidiques. En résumé, le protocole consiste à étaler en utilisant une tournette de la résine SU8 sur un wafer de silicium. La résine est ensuite chauffée, puis insolée à travers un masque, cette étape d'insolation consiste à exposer la résine photosensible au rayon UV pour permettre à la résine insolée de rester sur le wafer. L'étape suivante est le développement, elle consiste à enlever la partie de résine qui n'a pas été insolée en plongeant le wafer dans un solvant (PGMEA). Finalement, une cuisson finale permet de renforcer la structure des motifs.

Après moulage, les dispositifs en PDMS sont collés au plasma sur du verre.

2.3 Suspension des particules

Les suspensions étudiées sont constituées de particules sphériques de PMMA (poly méthacrylate de méthyle) de rayon $20\mu m$ et de masse volumique $1.18g/cm^3$. Notre fluide suspensif est un mélange de trois liquides newtoniens : Triton X100, 1,6-Dibromohexane, Ucon oil 75-H450, de fraction massique respectivement de 50%, 28% et 22%. Ce mélange permet d'avoir d'une part le même indice de réfraction et d'autre part la même densité que celle des particules [5]. Le but de l'isodensité est d'éviter la sédimentation des particules. En ce qui concerne l'indice de réfraction, nous avons besoin d'avoir un indice très proche de celui des particules de PMMA mais pas le même indice car sinon nous ne pourrions

pas voir les particules. Par conséquent, nous avons légèrement modifié la composition du mélange (iso-densité, iso-indice de réfraction) en rajoutant quelques gouttes du Triton X100 puisque c'est le liquide ayant la densité la plus proche de celle du PMMA.

3 Description et Analyse des résultats

3.1 Écoulement en micromodèle de milieu poreux.

Des essais préliminaires en micromodèle montrent que des hétérogénéités d'écoulement apparaissent spontanément lorsqu'une suspension relativement concentrée est injectée. En amont de constriction importante, des particules s'accumulent, construisant une zone où l'écoulement est bloqué. Dans d'autres endroits du milieu, ce bouchage se fait de manière intermittente.

La figure 3 montre un exemple de ces phénomènes que nous avons observés pour l'instant qualitativement. Afin de mettre en évidence les hétérogénéités d'écoulement, nous avons effectué les différences entre images consécutives, et moyenné dans le temps les valeurs absolues de ces différences. Nous obtenons ainsi une cartographie qui met en évidence les zones de stagnation où l'écoulement est bloqué (en bleu sur la figure). Les zones où le blocage est intermittent apparaissent également, en bleu clair.

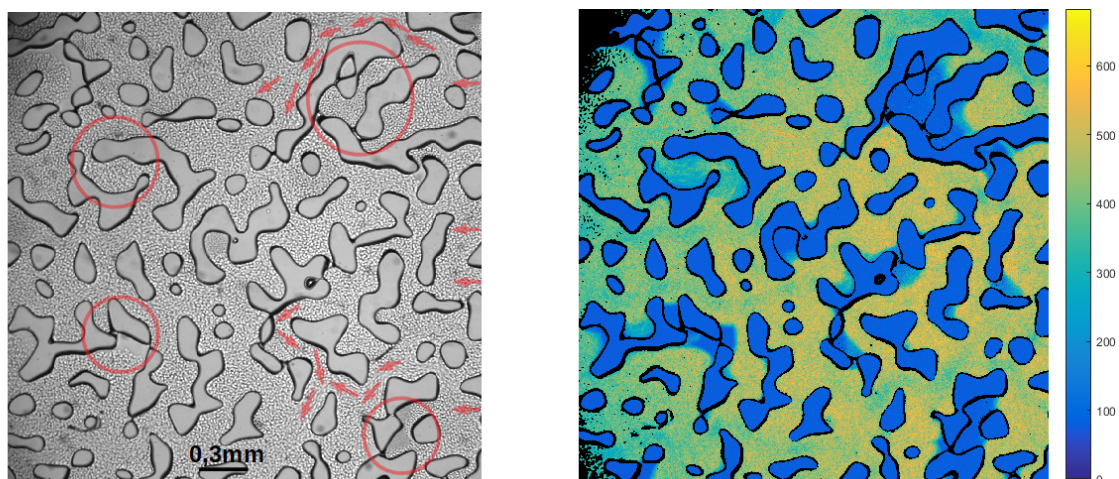


FIGURE 3 – Image d'une zone du micromodèle, avec un écoulement de suspension de fraction volumique 30%, et un débit de 0.05 mL/min. Les flèches montrent le sens de l'écoulement autour des plots. La vidéo correspondante montre des zones de stagnation. Elles sont mises en évidence sur l'image de droite, qui correspond à la moyenne temporelle des images de différence entre images consécutives. Les zones de stagnation apparaissent en bleu, et sont mises en valeur sur l'image de gauche par des cercles rouges.

Nous pouvons conclure de ces observations que des phénomènes locaux d'accumulation de particules provoquent des zones de stagnation, lesquelles sont relativement localisées. Aux débits et concentrations explorés, leur taille n'excède pas quelques pores.

3.2 Géométries simples

Afin de mieux décrire les phénomènes d'accumulations décrits ci-dessus en milieu poreux, nous avons conçu des géométries plus simples, à même de reproduire certains phénomènes (zone de stagnation, hétérogénéités de concentration) se produisant en micromodèle.

3.2.1 Obstacle dans un canal rectiligne

Nous avons par ailleurs étudié les conséquences de la présence d'un obstacle au milieu d'un canal rectiligne, tel que visible sur l'image de la figure 4. De part et d'autre de cet obstacle des canaux de 150 micromètres (soit 7.5 fois la taille d'une particule dans cette série d'expérience), permettent à la suspension de circuler, mais sont en eux-même des constriction importantes.

On constate en amont de l'obstacle une augmentation significative de la concentration. La suspension a même tendance à s'organiser, comme on peut le voir sur la figure 4. Régulièrement, des particules s'arrêtent dans les constriction, bloquant la suspension. Pendant ces phases de bouchage, seul le fluide suspendant les particules coule autour de l'obstacle. Il en résulte un appauvrissement en particules en aval, comme on peut le voir sur la figure 5. De manière plus surprenante, ce phénomène est intermittent. En effet, au bout d'un moment, le blocage cesse et les particules solides se remettent à couler et à contourner l'obstacle. Cette intermittence est visible sur la séquence d'image présentée figure 5.

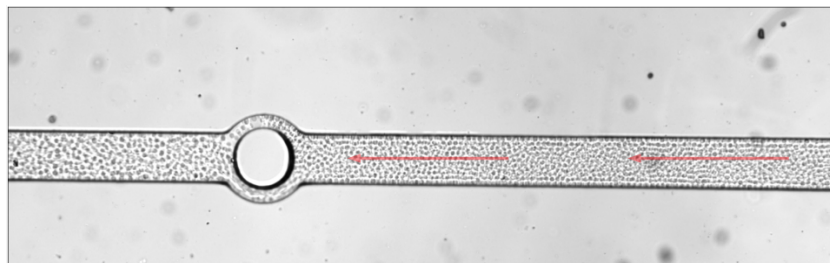


FIGURE 4 – Écoulement d'une suspension à 30% de particules de 20 micromètres, dans le canal de section $150 \times 100 \mu\text{m}$, présentant un obstacle circulaire. Le débit est de 0.03 ml/min, et est imposé de droite à gauche. En amont de l'obstacle, on constate une augmentation de la concentration en particules.

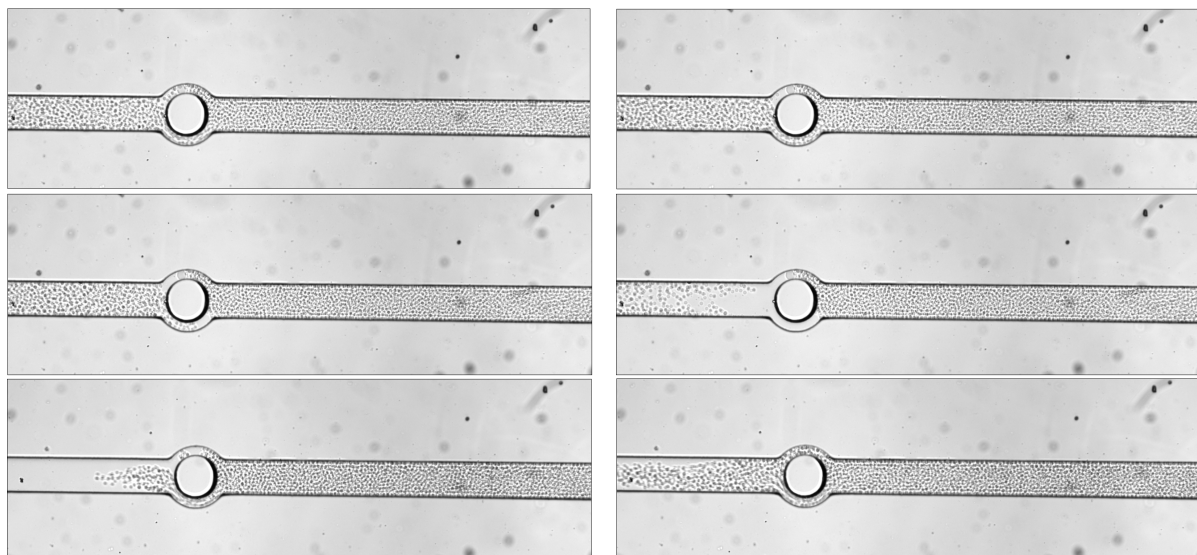


FIGURE 5 – Séquence d'images obtenues lors de l'écoulement de suspension dans un microcanal présentant un obstacle (mêmes conditions que sur la figure 4). Les images ont été obtenues aux temps suivants : 204.5 s, 205.4 s, 205.9 s, 209.4, 338.3 s, 338.7s - Ordre des images : de gauche à droite puis haut en bas.

3.2.2 Obstacle dans un canal en coude

La particularité de cette géométrie étudiée, représentée figure 6, est qu'il existe un angle entre le tronçon en amont et en aval de l'obstacle. Comme dans la précédente géométrie, nous observons un blocage intermittent des particules

Un bouchage intermittent, similaire à celui présenté sur les figures 4 et 5 est également reproduit. Pour cette géométrie, la présence de l'angle entre les canaux brise la symétrie. Nous observons que le blocage intervient toujours dans la branche du bas, c'est à dire, par le chemin le plus long. Une fois le blocage déclenché, il se propage sur l'autre branche.

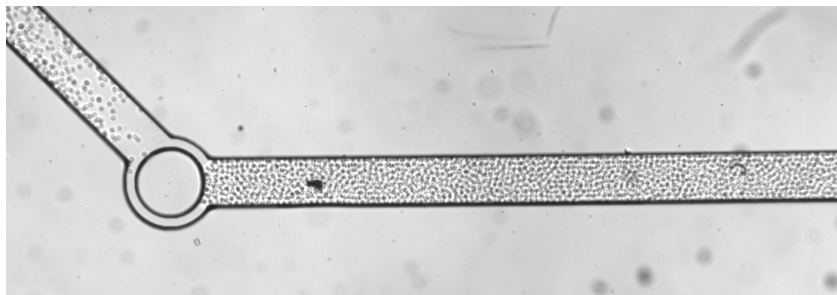


FIGURE 6 – Écoulement d'une suspension à 30% de particules de 20 micromètres, dans le canal coude de section $150 \times 100 \mu\text{m}$, présentant un obstacle circulaire. Le débit est de 0.03 ml/min, et est imposé de droite à gauche.

4 Conclusions et perspectives

Nous avons présenté des premières observations qualitatives du bouchage par une suspension de particules solides, réalisées dans des micromodèles de milieux poreux et dans des géométries simples. Nous avons vu que dans un milieu désordonné, certaines zones devenaient stagnantes et présentaient une petite accumulation de particules. Les observations réalisées dans des géométries plus simples permettent de reproduire ce phénomène. Ainsi, un simple obstacle au milieu d'un canal rectiligne peut engendrer un blocage intermittent.

Nous avons pour ambition d'étudier systématiquement ces phénomènes, en faisant varier les débits, la concentration en particules ainsi que leurs propriétés. En parallèle, nous avons élaboré un protocole permettant de rendre ces particules fluorescentes, ce qui nous permettra d'en déterminer la concentration localement. Les résultats préliminaires présentés dans ce manuscrit seront donc rendus quantitatifs grâce à cette méthodologie, et seront complétés par une étude systématique.

Références

- [1] S. Laurie Sanderson, Angela Y. CheerJennifer, S. GoodrichShow, Jenny D. Graziano, Todd Callan. Gradient Clogging in Depth Filtration. arXiv :cond-mat/9801147
- [2] S. Datta and S. Redner. Gradient Clogging in Depth Filtration. arXiv :cond-mat/9801147
- [3] Alvaro Marin, Henri Lhuissier, Massimiliano Rossi, Christian Kähler. Clogging in constricted suspensions. *Physical Review E*, American Physical Society (APS), 2018, 97 (2), pp.21102.
- [4] Jongwon Jung, Shuang Cindy Cao, Young-Ho Shin, Riyadh I. Al-Raoush, Khalid Alshibli, Jin-Woo Choi. *Microsyst Technol* (2018) 24 :1071–1080
- [5] S. Wiederseiner, N. Andreini, G. Epely-Chauvin, C. Ancey. *Exp Fluids* (2011) 50 :1183–1206.