

Écoulement lent d'un fluide à seuil dans une expansion-contraction: étude par IRM

T. CHEVALIER, S. RODTS, X. CHATEAU ET P. COUSSOT

Université Paris-Est, Laboratoire Navier (UMR 8205), CNRS, ENPC, IFSTTAR, F-77420 Marne-la-Vallée

Résumé :

Nous avons mesuré le champ de vitesse d'un fluide à seuil s'écoulant dans une expansion-contraction, ou pore modèle, à faible vitesse. A partir des mesures de champs de vitesses dans le pore modèle effectuées à différents débits, nous montrons que, dans la gamme de nombres de Bingham étudiée, le profil de vitesse adimensionnel dans le pore est indépendant du débit tout comme la position de l'interface solide-liquide. Dans cette gamme de nombres de Bingham (Bi), il existe une zone d'épaisseur significative dans laquelle le taux de cisaillement est presque uniforme. Une couche limite semble donc se développer dans les pores modèles à grands Bi . L'étude à des Bi plus faibles montre une brusque diminution de la vitesse au centre de la conduite au-delà d'une vitesse limite, renforçant ainsi le changement de régime d'écoulement au-delà de $Bi=10$.

Abstract :

We measured the velocity map of a yield stress fluid through an expansion-contraction, or model pore, at low velocity. From the data obtained at different flow rate, we show that, in the studied Bingham range, the adimensioned profil in the pore is independant of the flow rate as well as the solid-liquid interface. In this Bingham range, there exist a significative zone were the shear rate is almost uniform. A boundary layer seems to develop in model pore at high Bingham number. The study at lower Bingham number show a rapid decrease of the velocity in the center of the pore below a Bingham number (Bi) of 10. It is a other argument for the existence of an other flow regime above $Bi=10$.

Mots clefs : fluide à seuil, pore modèle

1 Introduction

Les écoulements de fluides non-newtoniens, et en particulier des fluides à seuil, dans des géométries confinées sont rencontrés dans de nombreux processus industriels: l'extrusion, l'injection de coulis de ciment pour renforcer les sols ou l'injection de boues de forages dans les roches. Balhoff et Thompson [1] évoquent l'effet important des pores convergents-divergents sur le comportement des fluides à seuil. On peut ainsi souligner que contrairement aux fluides newtoniens le volume de fluide mobilisé augmente au fur et à mesure que la différence de pression augmente. Une approche locale, à l'échelle du pore (convergent-divergent), peut fournir des informations cruciales sur les caractéristiques de l'écoulement, en particulier sur l'interaction entre les régions immobiles et celles en écoulement. La majorité des études numériques et expérimentales existantes sur les écoulements de fluides à seuil dans des pores modèles [2] portent sur des écoulements à petits nombres de Bingham où les effets du seuil d'écoulement ne sont pas dominants.

Ici, nous présentons une étude expérimentale par IRM de l'écoulement de fluides à seuil (émulsion concentrée) dans un pore modèle pour des nombres de Bi élevés. Après une présentation des techniques expérimentales utilisées, nous analysons les profils de vitesse obtenus à différents Bi . Nous présentons pour finir, des résultats obtenus de la mesure directe de la distribution statistique moyenne des vitesses sur la géométrie.

2 Matériels et méthodes

2.1 Fluide

Le fluide à seuil modèle utilisé ici est une émulsion inverse qui se compose de gouttes d'eau dans une phase continue d'huile (dodécane) stabilisées par un surfactant (Span 80). Aux hautes concentrations en phase dispersée, les gouttes viennent en contact les unes avec les autres et le fluide acquiert son caractère de fluide à seuil [3]. Pour chaque essai, nous effectuons une mesure de la loi d'écoulement du matériau avant et après l'essai afin de s'assurer que le passage du fluide dans la géométrie n'a pas modifié ses caractéristiques. La loi d'écoulement est obtenue à l'aide d'un rhéomètre Bohlin contrôlé en contrainte et équipé de deux disques rugueux parallèles d'un diamètre de 40mm. L'émulsion a un comportement de fluide à seuil simple et sa courbe d'écoulement peut être modélisée par une loi de type Herschel-Bulkley [4]: $\tau = \tau_c + k\dot{\gamma}^n$ avec τ la contrainte de cisaillement, $\dot{\gamma}$ le taux de cisaillement, τ_c le seuil en Pa , k le facteur de consistance en $Pa.s^n$ et n l'indice de comportement. Une courbe typique d'écoulement est représentée sur la figure 1. Nous trouvons les paramètres matériau suivant pour l'émulsion: $\tau_c = 74Pa$, $k = 13.5 Pa.s^n$ et $n = 0.4$.

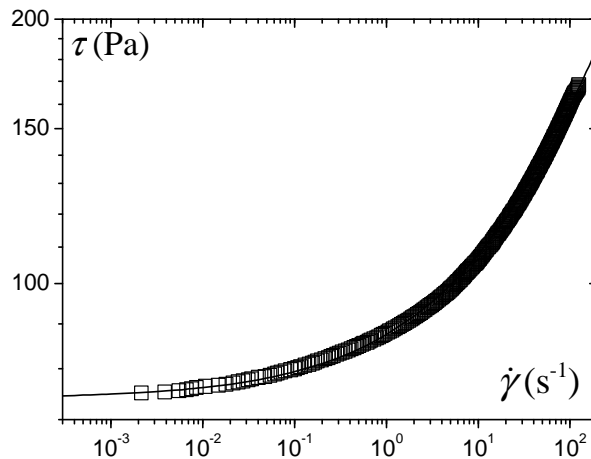


FIG. 1 – Courbe d'écoulement de l'émulsion inverse utilisée pour les expériences. La ligne continue correspond à l'ajustement du modèle d'Herschel-Bulkley sur les données avec les paramètres suivant :

$$\tau_c = 74Pa, k = 13.5 Pa.s^n \text{ et } n = 0.4.$$

2.2 Montage expérimental

Le montage expérimental est basé sur celui décrit précédemment dans Rabideau [5]. Une seringue insérée dans un IRM pousse le fluide dans la géométrie désirée. Dans cette étude, nous utilisons un divergent-convergent axisymétrique comme illustré sur la figure 2. Un pore modèle unique de 7cm de diamètre permet la réalisation d'image de vitesse et l'obtention directe de distribution de vitesse. La série de pores de 1cm de diamètre permet d'accéder à des vitesses plus importantes que la première géométrie mais n'autorise que l'obtention des distributions de vitesse.

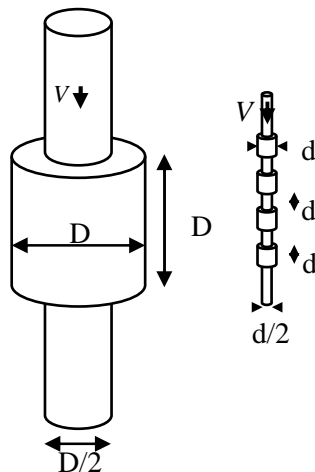


FIG. 2 – Géométries utilisées : pores modèles axisymétriques avec un diamètre $D=7cm$ et $d=1cm$.

Les caractéristiques de l'écoulement viennent des conditions aux limites et du nombre de Bingham qui estime le rapport entre les parties constante (élastique) et dépendante du temps (visqueuse) telle que définit par la relation suivante : $Bi = \tau_c R^n / kV^n$. Dans cette expression nous utilisons arbitrairement le gradient de vitesse apparent V/R dans la petite conduite.

2.3 Technique de mesure

Une technique d'étude non invasive des fluides à seuil en milieu poreux est la résonance magnétique nucléaire (RMN). Les mesures sont réalisées directement sur le noyau d'hydrogène il n'y a donc pas d'ajout de traceurs. Pour l'étude d'écoulements en milieux confinés, deux types de mesures sont habituellement rencontrées : l'acquisition des images de champs de vitesse où une ou plusieurs composantes de la vitesse sont mesurées dans chaque pixel/voxel [5] et la mesure de la statistique de distribution, ou propagateur, d'une ou plusieurs composantes de la vitesse. Ces deux techniques sont utilisées dans cette étude. Les images de vitesse sont enregistrées sur une tranche verticale de 1cm d'épaisseur incluant l'axe central à l'aide d'une procédure IRM que nous avons conçue et qui est basée sur les concepts standard d'encodage de la phase de la vitesse [6-7]. La taille des voxels dans l'espace de Fourier dans les directions radiale et longitudinale est respectivement de 1 et 4mm. L'incertitude sur la mesure pour une expérience donnée est de 3% de la vitesse maximale dans la petite conduite. Au contraire, la mesure du propagateur de vitesse [8] est une technique qui n'a pas de limitation sur la résolution spatiale.

3 Résultats

3.1 Écoulement typique en pore modèle

Cette étude a été réalisée à faible vitesse d'injection afin de visualiser l'influence du seuil d'écoulement dans la géométrie avec $D=7$ cm. La figure 3 illustre une carte de vitesse typique : une partie centrale (en bleu) et une partie fortement cisailée (en vert) s'écoulent et des zones (en rouge) sont à l'arrêt. Près du seuil d'écoulement, contrairement aux fluides newtoniens, l'écoulement ne s'élargit presque pas lors de l'expansion et donc une partie du volume de fluide n'est pas mobilisé.

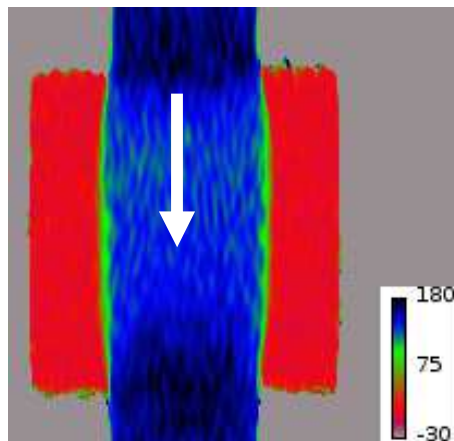


FIG. 3 – Carte de vitesse dans une coupe longitudinale pour une vitesse moyenne à l'entrée $V = 0.16$ mm/s. La vitesse (en microns par seconde) dans chaque voxel est représentée par une couleur définie selon l'échelle en bas à droite.

Tout au long de la géométrie, un écoulement de type bouchon, comme celui représenté sur la figure 4, est présent. Au milieu de la conduite de 7cm de diamètre, dans la partie large du pore, les profils de vitesse ne varient pas sur une distance de 3cm (voir figure 4). Un écoulement uniforme s'établit donc sur une zone longue de 3cm au centre du pore de 7cm de long. Cet écoulement est assez surprenant et n'a jamais été reporté à notre connaissance. En effet, en dépit du fait que l'écoulement peut envahir un volume plus grand, il préfère adopter ce profil uniforme.

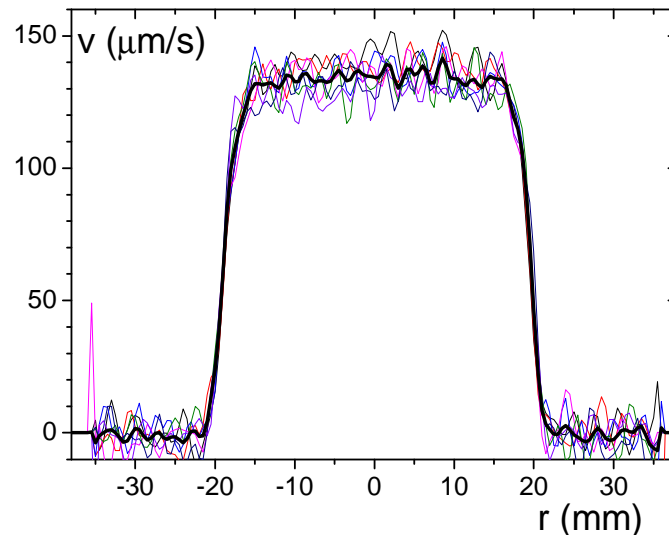


FIG. 4 – Ecoulement d'un fluide à seuil dans le centre de la boîte ($V = 0.16$ mm/s - $Bi=36$) : vitesse longitudinale en fonction de la distance à l'axe. Profils de vitesse à différentes distances du centre de la conduite large : tout les 0.5cm depuis $z=-1.5$ cm jusqu'à $z=1.5$ cm. ($z=0$ cm étant le centre de la conduite de 7cm). La ligne noire correspond au profil moyen sur cette zone.

3.2 Influence de la vitesse sur l'écoulement

Des expériences ont été réalisées dans une gamme de vitesses permettant d'atteindre des nombres de Bi de 36 à 7 dans les pores de 7cm. Dans cette gamme, on observe un profil uniforme sur 3cm au centre de la conduite de 7cm. La figure 5 représente les profils moyennés sur cette zone de 3cm pour l'ensemble des vitesses utilisées. Dans la gamme étudiée, les profils adimensionnés par la vitesse moyenne V se superposent. Il n'y a donc pas de modification de l'écoulement malgré l'augmentation de la vitesse. En particulier, la largeur de la zone s'écoulant reste la même sauf pour la vitesse de 9.4 mm/s qui correspond au Bi le plus faible ($Bi=7$) où on observe un élargissement du profil. Le gradient de vitesse adimensionné reste aussi le même sur la gamme de vitesse étudiée ce qui fait penser à l'existence d'une couche limite. Contrairement à ce qu'il se passe à des Bi plus faibles [2] la limite solide-liquide dans le pore n'évolue donc pas ou peu et ce dans une gamme de Bi allant de 36 à 7.

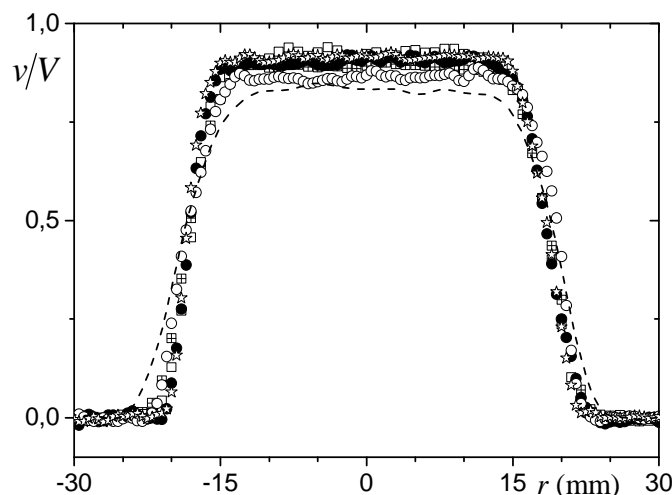


FIG. 5 – Profil de vitesse longitudinale (adimensionné par la vitesse moyenne dans la petite conduite) pour l'écoulement d'un fluide à seuil à travers une boîte pour $V=0.16$ mm/s (cercles ouverts), 0.52 mm/s (étoiles), 1.6 mm/s (cercles pleins), 2.6 mm/s (carrés ouverts), 5.2 mm/s (carrés barrés), and 9.4 mm/s (ligne pointillée). Les profils sont moyennés sur une zone de 3cm autour du centre de la conduite large.

L'évolution de l'écoulement dans l'expansion-contraction peut aussi être étudiée en suivant la différence de vitesse entre la vitesse maximale au centre de la grosse conduite et celle dans la petite conduite. Plus

la différence entre les deux augmente, plus l'écoulement s'étend dans la grande conduite. On peut obtenir les valeurs de ces deux vitesses soit en traçant les profils de vitesse soit en traçant la distribution statistique de vitesse, appelée aussi propagateur. A partir d'une image de champs de vitesse, on peut tracer la distribution statistique de vitesse associée. Ici l'image de vitesse est réalisée dans une tranche donc pour tracer le propagateur associé, on prend en compte la géométrie circulaire du pore utilisé ici. Une courbe typique de propagateur est représentée sur la figure 7. Sur ce propagateur, lorsque qu'une vitesse apparaît plus souvent que les autres, il y a un pic. Trois pics sont ainsi visibles. Le pic 3 regroupe les zones mortes, en rouge sur la figure 7 à gauche, qui représentent une part importante du fluide. Les pics 1 et 2 correspondent respectivement aux écoulements uniformes au centre du pore et dans la petite conduite.

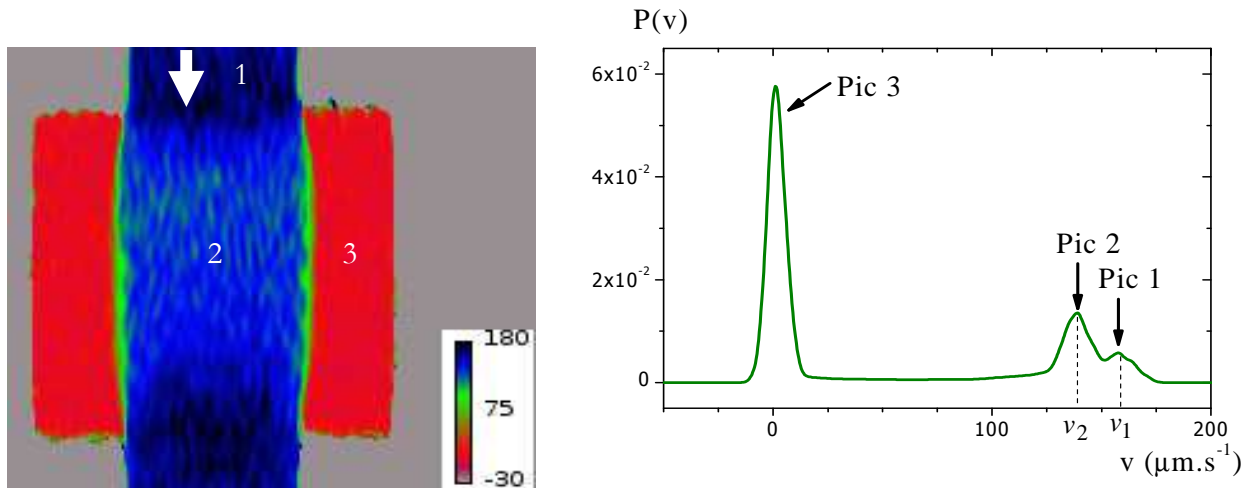


FIG. 7 – Carte de vitesse dans une coupe longitudinale pour une vitesse moyenne à l'entrée $V = 0.16$ mm/s (sur la gauche) et la distribution de vitesses longitudinales associée (sur la droite). Les différents pics sur le graphique de droite correspondent aux zones numérotées sur la carte de vitesse à gauche.

En utilisant les données dans le pore de 7cm et celles issues des propagateurs dans les pores de 1cm, on obtient la différence de vitesse $v_1 - v_2$ sur une gamme de Bi de 0.9 à 36. Les résultats sont présentés sur la figure 8 où la différence de vitesse $v_1 - v_2$ a été adimensionnée par la vitesse moyenne V afin de comparer les données sur la gamme de Bi étudiée. Cette représentation met en évidence que pour des Bi supérieur à 10, il y a un plateau qui se forme et la différence de vitesse entre l'écoulement uniforme du centre de la conduite et celui dans la petite conduite tend à se stabiliser. Un changement de régime d'écoulement a donc lieu à un Bi de 10.

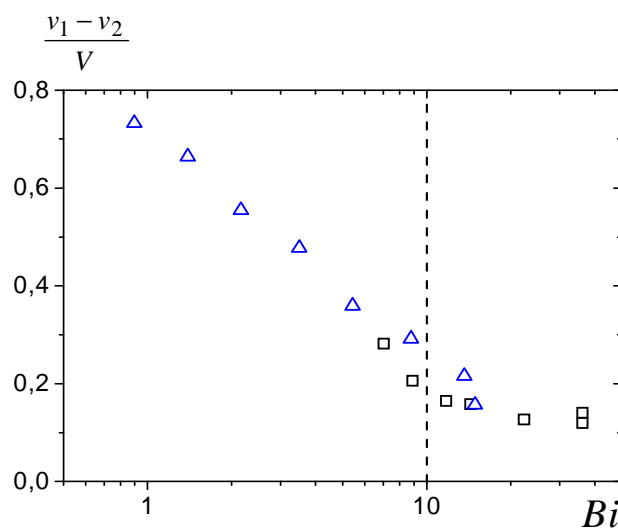


FIG. 8 – Différence de vitesses entre le pic de la conduite large (v_2) et celui de la petite conduite (v_1) dans les petits pores de 1cm (triangle) et dans le gros pore de 7cm (carrés)

4 Conclusions

Nous avons réalisé des expériences d'écoulement de fluides à seuil en géométries confinées à faibles vitesses. L'analyse des résultats a permis de mettre en évidence l'existence d'une zone d'écoulement uniforme au centre du pore étudié pour des grands nombres de Bingham. Par ailleurs, quelle que soit la vitesse étudiée, en adimensionnant la vitesse par la vitesse moyenne, les profils dans cette zone centrale se superposent ce qui suggère l'existence d'une couche limite. La limite solide-liquide reste donc stable sur une gamme de Bingham non négligeable. Cette observation a été renforcée par l'utilisation des distributions de vitesse dans des pores plus petits ce qui a permis d'atteindre des nombres de Bingham plus petits. L'analyse de ces propagateurs, en observant l'évolution de la différence entre la vitesse au centre du pore et celle dans la conduites d'entrée, a montré un nombre de Bingham limite au-delà duquel la valeur de cette différence de vitesse se stabilise. L'existence d'une couche limite suggère que, même dans des écoulements complexes dans des géométries confinés, une couche liquide d'épaisseur non négligeable se maintient toujours entre les zones à l'arrêt et celles en écoulement bouchon.

References

- [1] Balhoff M.T., Thompson K.E., Modeling the steady flow of yield stress fluids in packed beds, *AIChE J.*, 50, 034-3048, 2004.
- [2] Souza Mendes P.R., Naccache M., Vargas P. R., Marchesini F. H., Flow of viscoplastic liquids through axisymmetric expansions–contractions , *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 142,207-17, 2007.
- [3] Mason T.G., Bibette J., Weitz D.A., Yielding and Flow of Monodisperse Emulsions, *J. Colloid Interface Sci.*, 179, 439-448, 996.
- [4] Coussot P., Rheometry of pastes, suspensions and granular materials, Wiley, New York, 2005.
- [5] Rabideau B.D., Moucheron P., Bertrand F., Rodts S., Roussel N., Lanos C., Coussot P., The extrusion of a model yield stress fluid imaged by MRI velocimetry, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 65, 394-408, 2010.
- [6] Stapf S. and Han S., *NMR Imaging in Chemical Engineering*, Wiley, New York, 2006.
- [7] Rodts S., Boujlel J., Rabideau B., Ovarlez G., Roussel N., Moucheron P., Lanos C., Bertrand F., Coussot P., Solid-liquid transition and rejuvenation similarities in complex flows of thixotropic materials studied by NMR and MRI, *Physical Review E*, 81, 021402-1-15, 2010.
- [8] Heinen C., Buggisch H., Guthausen G., Flow of newtonian/non-newtonian fluids in a bundle of tubes and in a packing of beads by MRI, *Magnetic Resonance Imaging*, 21, 377-379, 2003.