

Généralisation de la loi de Darcy dans les milieux poreux pour les fluides à seuils : une approche statistique

L. Talon & T. Chevalier

Laboratoire FAST, Univ. Paris-Sud, CNRS, Université Paris-Saclay, F-91405, Orsay, France.2
 talon@fast.u-psud.fr

Les écoulements de fluides complexes interviennent dans de nombreux processus industriels. En particulier, dans les méthodes de récupération pétrolière (Enhanced Oil Recovery), il est courant d'injecter des polymères dont la rhéologie est fortement non-Newtonienne. Les boues et les huiles lourdes ont également un fort caractère non Newtonien. Parmi les nombreuses déviations à la rhéologie Newtonienne, nous nous intéressons ici au cas des fluides à seuil, pour lesquels un seuil de contrainte minimal est nécessaire afin que le fluide puisse s'écouler. Si la contrainte est inférieure à ce seuil, le fluide se comporte alors comme un solide indéformable.

La loi rhéologique qui nous intéresse ici est celle de Bingham qui représente la loi la plus simple pour ces types de fluides :

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{\mu_0}(\tau - \tau_0), \quad (1)$$

où $\dot{\gamma}$ est le taux de cisaillement, τ la contrainte appliquée et τ_0 le seuil de contrainte. Il est important de souligner ici qu'un fluide de Bingham se comporte comme un fluide Newtonien pour les fortes valeurs de contraintes.

Compte tenu des enjeux, ce problème a ainsi suscité de nombreux travaux depuis les années soixante. Il apparaît cependant que toutes les lois qui ont été proposées dans la littérature sont linéaires (pour un fluide de Bingham). Ce fait est d'autant plus surprenant que les équations régissant les fluides à seuil est très fortement non-linéaire.

Dans un premier temps, nous avons montré numériquement que l'on devrait s'attendre à une relation beaucoup plus complexe. En particulier, on constate la présence de trois lois de puissance $q = (\nabla P - \nabla P_c)^\alpha$, avec α valant successivement 1, 2 et 1 et ∇P_c une pression critique. L'origine de ces trois régimes peut se comprendre qualitativement. Le premier régime linéaire correspond au cas où un seul canal s'écoule. Tant que seul ce chemin coule on peut s'attendre à ce que le débit reste linéaire avec la pression. Par contre, à partir du moment où de nouveaux chemins commencent à s'écouler, le débit va croître plus rapidement (puissance de 2, ici). Enfin, lorsque tout le milieu s'écoule, on retrouve un comportement linéaire car tout le fluide est déseuillé et se comporte comme un fluide Newtonien.

Dans un second temps, nous avons cherché à déterminer l'origine de l'exposant 2 du régime intermédiaire. Nous avons montré par une analyse statistique des zones d'écoulements que ce problème présente des analogies avec les phénomènes critiques. Notamment, nous avons pu montrer que la distribution des zones arrêtées suit loi de puissance avec une échelle de coupure. De plus, cette échelle de coupure diverge comme une puissance de l'écart au seuil $\nabla P - \nabla P_c$. Nous verrons qu'un raisonnement d'échelle permet de relier les exposants de la distribution à l'exposant de la loi de Darcy.

Enfin, nous avons développé un modèle simple, basé sur une analogie avec les problèmes de ligne élastique en milieu désordonné, qui permet de retrouver ces exposants mais également de montrer que la distribution de l'écoulement s'apparente à une dynamique en avalanche.