

Mesures de propriétés viscoélastiques de solutions de polymères diluées par migration transverse de particules en écoulements de Poiseuille confinés

A. Naillon^a, X. Salas^a, W. Chèvremont^a, C. de Loubens^a et H. Bodiguel^a

^aUniv. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, LRP, Grenoble, France
Antoine.naillon@univ-grenoble-alpes.fr

Résumé :

Des particules dans un écoulement d'une solution viscoélastique migrent perpendiculairement aux lignes de courant vers les zones de faible taux de cisaillement à cause d'une anisotropie des contraintes normales. Nous avons mesuré expérimentalement la vitesse de migration de microparticules en écoulement dans des solutions de polymères diluées grâce à une nouvelle méthode de suivi de particules en 3 dimensions. Les propriétés viscoélastiques des solutions ont été caractérisées précisément afin de comparer les résultats expérimentaux aux prédictions théoriques. Ainsi, nous avons validé que la vitesse de migration évoluait proportionnellement au carré du nombre de Weissenberg et proportionnellement au ratio taille de particule sur ouverture du canal, conformément à la théorie développée pour des petits nombres de Weissenberg. Néanmoins, nous avons mis en évidence que les prédictions surestimaient de quelques dizaines de pourcents les vitesses mesurées expérimentalement. De manière réciproque, notre dispositif nous permet de déterminer les forces normales dans des solutions viscoélastiques diluées en mesurant la vitesse de migration.

Abstract:

In a flow of a viscoelastic solution, particles migrate in the transverse direction of the liquid stream lines towards the region with a low shear rate because of an inhomogeneous distribution of normal stress around the particle. We have measured the migration velocity of micro-particles in a flow of dilute polymer solutions using a new method of particle tracking velocimetry in 3D. The viscoelastic properties of the solution have been measured precisely in order to test the theoretical prediction. We have validated that the migration evolves with the square of the Weissenberg number, and proportional to the ratio between particle size and channel aperture. Nevertheless, we found that the predictions overestimate by a few tenth the migration velocity. Reciprocally, our set up allows us to determine the normal forces in dilute viscoelastic solution measuring the migration velocity.

Mots clefs : migration de particules, rhéométrie, viscoélasticité, PTV.

1 Introduction

Des particules dispersées dans un liquide Newtonien peuvent migrer perpendiculairement aux lignes de courant à cause de l'inertie [1] ou de leur déformabilité [2]. Dans le cas d'une suspension semi-diluée, les particules peuvent également migrer à cause d'un gradient du taux de cisaillement [3]. Cependant, aucune migration transverse n'est attendue dans pour un écoulement d'une suspension diluée à faible nombre de Reynolds. A l'opposé, les liquides viscoélastiques présentent une anisotropie des contraintes normales. Elle amène à une résultante des forces s'appliquant sur une particule dans la direction perpendiculaire aux lignes de courant différentes de zéro [4]. Cette force est particulièrement intéressante car elle dépend de la taille des particules à la puissance 3. Cet effet apparaît donc très prometteur pour la séparation de particules de différentes tailles ou pour la mesure de propriétés viscoélastiques.

Cet effet a été mis en évidence expérimentalement [5], puis étudié théoriquement [4,6] dans les années 60-70. Récemment, de nombreuses équipes s'y sont intéressées à nouveau en mettant en avant la possibilité de focaliser l'ensemble des particules au centre d'un microcanal [7–10]. Ces études ont étudié la migration viscoélastique en faisant varier la section des canaux, les propriétés rhéologiques des fluides, et les régimes d'écoulements. Néanmoins, afin d'utiliser cet effet, une étude quantitative et systématique de la migration de particules est nécessaire.

Une première difficulté à la mesure quantitative de la migration des particules est de caractériser les propriétés rhéologiques des solutions. C'est-à-dire que la majorité des expériences sont réalisées à faible nombre de Weissenberg, pour laquelle la mesure directe des forces normales est impossible avec des outils de rhéométrie classique. Une seconde difficulté est la mesure de la migration des particules. En effet, à faible nombre de Weissenberg, la vitesse de migration transverse est beaucoup plus faible que la vitesse longitudinale, et semble donc difficile à mesurer précisément.

Dans cette étude, nous proposons de caractériser de manière quantitative et systématique la migration de particules dans des solutions de polymères dilués en écoulement à l'intérieur d'un microcanal de section rectangulaire, puis de comparer nos résultats expérimentaux aux prédictions théoriques. Pour ce faire, nous avons caractérisé finement les propriétés viscoélastiques de nos solutions (paragraphe 2.2). Puis, nous avons développé une méthode de suivi de particules en 3 dimensions (paragraphe 2.3) qui nous permet de suivre l'évolution de la densité de probabilité de présence des particules à une position verticale donnée le long du canal (paragraphe 3).

2 Matériel et méthode

2.1 Dispositif expérimental

Les solutions viscoélastiques utilisées sont des solutions de polymères : polyvinylpyrrolidone (PVP) ou polyacrylamide (HPAM). Les particules sont des microparticules fluorescentes en polystyrène, de rayon 4,95 et 2,4 μm , et de densité 1050 kg/m^3 . La migration des particules est étudiée dans un capillaire en

verre rectangulaire de $55,8 \times 1100 \mu\text{m}^2$. Le dispositif expérimental est présenté figure 1. Afin de procéder à une étude systématique, la pression d'alimentation, la taille des particules et la concentration en polymères ont été modifiés. Les différents paramètres expérimentaux sont présentés dans le tableau 1.

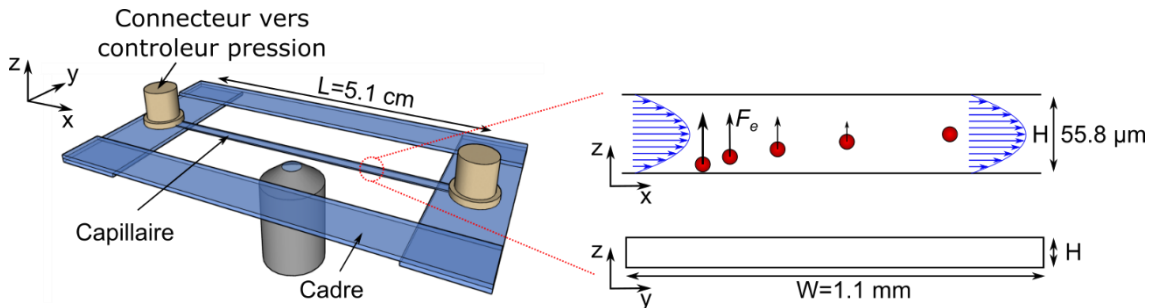


Figure 1 : Dispositif expérimental : la migration viscoélastiques des particules est étudiée expérimentalement dans un canal de $55.8 \mu\text{m}$ d'ouverture.

2.2 Rhéométrie

Les propriétés rhéologiques des solutions ont été caractérisées à l'aide de deux méthodes complémentaires. Un rhéomètre rotatif MCR 501 avec une géométrie cône-plan (diamètre de 75mm, angle de $0,991^\circ$) a été utilisé pour mesurer la viscosité. Ces solutions présentent une faible rhéofluidification à fort taux de cisaillement. Néanmoins, pour toute les expériences de migration réalisées, le taux de cisaillement maximal subi par l'écoulement est inférieur au taux de cisaillement pour lequel commence à apparaître la rhéofluidification. Ainsi, nous considérons la viscosité η_0 indépendante du cisaillement (voir tableau 1).

Polymères	% massique	Indice de réfraction	Rayon des particules (μm)	ΔP (mbar)	η_0 (mPa.s)	τ (ms)
HPAM	8	1,347	9,9	100, 200 , 300	148,9	1,1
HPAM	9,5	1,35	9,9	100, 300, 500	368,8	2,7
HPAM	10	1,3510	4,8	300, 500, 1000	417,3	2,9
HPAM	11	1,352	9,9	100, 300, 500	657,2	3,6
PVP	5	1,314	9,9	75	40	1,6
PVP	7,5	1,346	9,9	100, 150, 200	133,2	3,5
PVP	10	1,35	9,9	100, 200, 400	311,5	6

Tableau 1 : paramètres expérimentaux et propriétés rhéologiques des solutions de polymères.

La mesure directe des forces normales inaccessible par rhéométrie classique pour ce type de solutions, les propriétés viscoélastiques ont été déterminées en mesurant le temps de relaxation viscoélastique, τ . Cette mesure est également difficile à obtenir avec un rhéomètre standard dans le cas de solutions faiblement élastiques. Ainsi, nous avons utilisé une méthode de rhéométrie extensionnelle par rupture

de pont capillaire (CaBER), dans sa variante de rétraction lente [11]. Cet outil nous a permis de réussir la mesure de temps de relation viscoélastique de l'ordre de la milliseconde (voir tableau 1).

2.3 Suivi de particules en 3 dimensions

Afin de mesurer la vitesse de migration des particules, nous avons développé une méthode de suivi de particule en 3 dimensions. Cette méthode se base sur un algorithme classique de suivi de particules en 2 dimension, couplé à une méthode de détection de la position verticale des particules inspirée des travaux de Seo et al. [12]. Cette méthode nous permet de scanner l'ensemble de la profondeur du canal en une seule fois, et ainsi acquérir rapidement un grand nombre de trajectoires.

3. Résultats et discussion

A l'aide des différentes méthodes présentées précédemment, nous avons pu mesurer l'évolution le long du canal de la densité de probabilité de présence de particules à une position verticale z . Figure 3, il apparait que la migration de particules est d'autant plus rapide que le nombre de Weissenberg et le rapport diamètre des billes sur ouverture du canal, noté β , sont grands.

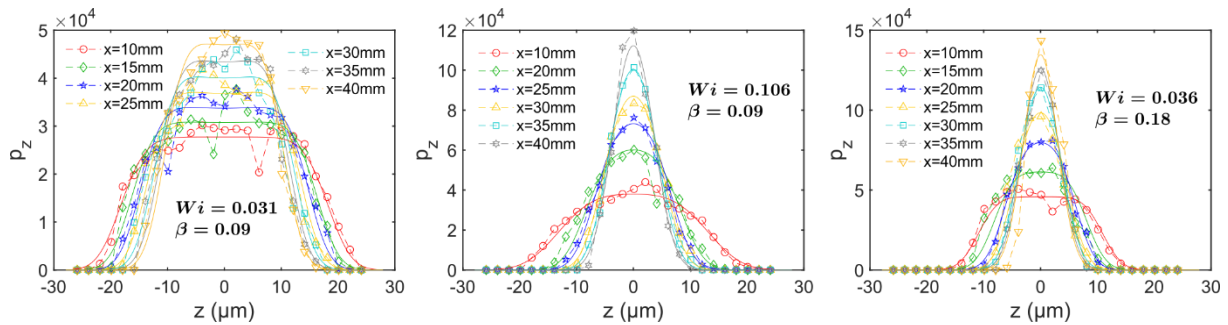


Figure 2 : mesure de la densité de probabilité de présence des particules à une position z le long du canal, noté p_z , pour deux Weissenberg différents. En lignes continues, fit avec la prédiction théorique.

Théoriquement, la force s'appliquant sur les particules dans la direction transversale à un écoulement de Poiseuille s'écrit :

$$F_{e,th} = -K\eta\bar{v}_x Wi \beta^2 z^* \quad (1)$$

où \bar{v}_x est la vitesse moyenne longitudinale, et K un préfacteur numérique égal à 5π [4] ou $22\pi/5$ [6] suivant la théorie considérée. En équilibrant cette force à la force de trainée d'une particule sphérique, la vitesse de migration est :

$$v_z = -\frac{K}{6\pi} \bar{v}_x Wi \beta^2 z^* \quad (2)$$

L'équation (2) nous permet de prédire l'évolution théorique de p_z le long de l'écoulement. Pour chaque jeu de paramètres expérimentaux, nous avons fitter l'évolution des densités de probabilité le long du canal avec un unique paramètre K . Sur la figure 2, il apparait qu'une seule valeur de K permet de prédire l'ensemble des densités de probabilité obtenues pour une expérience.

Sur la figure 3a, l'évolution de la largeur des densités de probabilité p_z pour l'ensemble des expériences est représentée. Une adimensionnalisation par $Wi\beta^2$ permet d'obtenir une courbe maîtresse qui valide le scaling de la force élastique avec $Wi\beta^2$. En effet, même si l'accord n'est pas parfait dans le cas du PVP, il apparaît très robuste pour le HPAM.

Enfin, pour comparer quantitativement les expériences et la théorie, les valeurs de K_{exp} et K_{th} sont tracées sur la figure 3b en fonction des propriétés viscoélastiques des solutions. En moyenne, la valeur de K_{exp} est égale à 10,61, environ 30% inférieure aux prédictions théoriques.

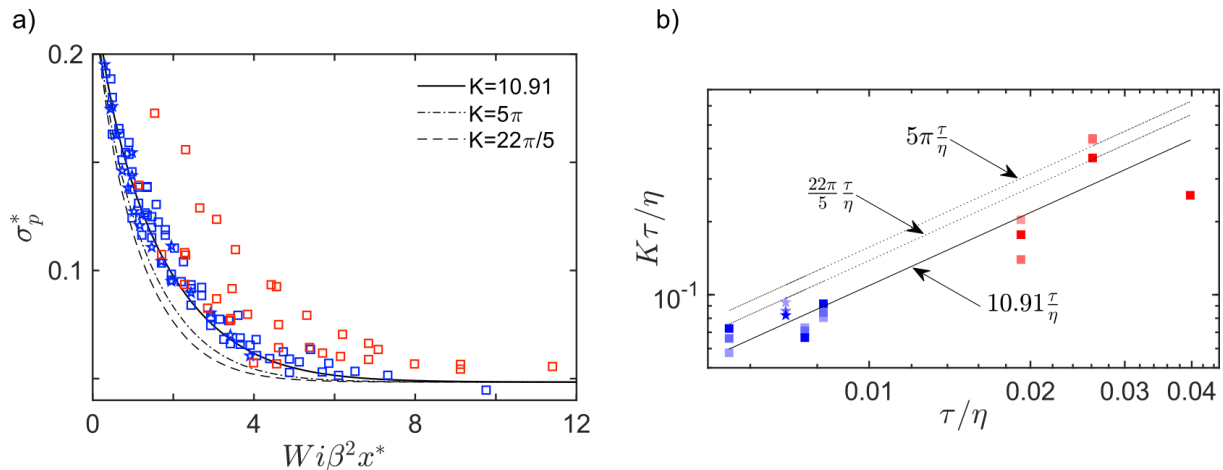


Figure 3 : Comparaison de la vitesse de migration expérimentale et théorique. a) Evolution de l'écart type de p_z . b) Comparaison entre le préfacteur théorique et expérimental de la force normale viscoélastique. En rouge, les expériences dans le PVP et en bleu dans le HPAM.

Actuellement, nous ne sommes pas capables d'expliquer l'origine de cette différence. A notre connaissance, aucune étude quantitative n'a été menée de manière aussi précise, afin de mesurer cette écart. Une perspective intéressante serait de poursuivre l'étude en travaillant avec des nombres de Weissenberg et des confinements géométriques plus faibles, pour se retrouver dans exactement les mêmes hypothèses que les études théoriques.

Enfin, la détermination précise de ce préfacteur numérique nous permet d'utiliser ce dispositif de manière réciproque. C'est-à-dire que l'on peut mesurer la vitesse de migration de particules afin de déterminer les forces normales présentes dans la solution.

Références

- [1] B. P. Ho and L. G. Leal, *J. Fluid Mech.* **65**, 365 (1974).
- [2] S. S. Shevkoplyas, T. Yoshida, L. L. Munn, and M. W. Bitensky, *Anal. Chem.* **77**, 933 (2005).
- [3] A. Acrivos and D. Leighton, *J. Fluid Mech.* **181**, 415 (1987).
- [4] B. P. Ho and L. G. Leal, *J. Fluid Mech.* **76**, 783 (1976).
- [5] A. Karnis and S. G. Mason, *J. Rheol. (N. Y. N. Y.)* **10**, 571 (1966).
- [6] P. Brunn, *Rheol. Acta* **15**, 589 (1976).
- [7] A. M. Leshansky, A. Bransky, N. Korin, and U. Dinnar, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 1 (2007).
- [8] G. D'Avino, F. Greco, and P. L. Maffettone, *Annu. Rev. Fluid Mech.* **49**, 341 (2017).
- [9] D. Yuan, Q. Zhao, S. Yan, S.-Y. Tang, G. Alici, J. Zhang, and W. Li, *Lab Chip* **18**, 551 (2018).
- [10] X. Lu, C. Liu, G. Hu, and X. Xuan, *J. Colloid Interface Sci.* **500**, 182 (2017).
- [11] L. Campo-Deaño and C. Clasen, *J. Nonnewton. Fluid Mech.* **165**, 1688 (2010).
- [12] K. W. Seo, Y. J. Kang, and S. J. Lee, *Phys. Fluids* **26**, 063301 (2014).