

Etudes expérimentales et numériques de l'écoulement d'un fluide à seuil autour d'un cylindre.

S. MOSSAZ, P. JAY, A. MAGNIN

Laboratoire de Rhéologie (UMR 5520, Université Joseph Fourier-Grenoble I, Grenoble-INP, CNRS), BP 53, Domaine universitaire, 38041 Grenoble Cedex 9, France

Résumé :

Nous mettons en évidence l'influence du seuil d'écoulement sur les champs cinématique et de contrainte dans l'écoulement d'un fluide à seuil autour d'un cylindre. Les effets inertiels et de rhéofluidification sont également considérés. Nous nous intéressons plus particulièrement aux régimes rampant et recirculant. Des résultats expérimentaux obtenus sur un canal instrumenté et des résultats numériques seront présentés.

Abstract :

In this paper, the influence of yield stress on stress and kinematic fields in the flow of a viscoplastic fluid around a cylinder is described. The shear thinning and inertial effects are also considered. The creeping and recirculating flows are particularly examined. Experimental results obtained with a channel and numerical results are presented.

Mots clefs : Fluide viscoplastique, Cylindre, Inertie, Rhéofluidification, Zone rigide.

1 Introduction

De nombreux articles ont été publiés récemment dans la littérature internationale sur les écoulements de fluide viscoplastique autour d'obstacles [1-3]. Le but de ces études est en général de fournir des outils pour le dimensionnement d'installations (mélangeur, filtration,...). Elles se concentrent donc principalement sur les forces de trainées. Ce sont essentiellement des études numériques pour des écoulements laminaires. Il faut tout de même noter que des travaux récents [4-6] se sont intéressés à la visualisation des champs de vitesses. En ce qui concerne l'écoulement autour d'un cylindre, on peut citer les travaux de Tokpavi et al. [7]. Numériquement et pour le cas des écoulements avec inertie, Mossaz et al. [8] ont montré l'influence des paramètres d'entrées que sont le nombre d'Oldroyd, le nombre de Reynolds et l'indice de la loi puissance sur l'apparition des différents régimes, sur la répartition des contraintes et sur la morphologie de l'écoulement.

Dans cette étude, nous étudierons le cas de l'écoulement inertiel d'un fluide à seuil de contrainte autour d'un cylindre à section circulaire. Le fluide utilisé est le gel physique Carbopol® 940 à comportement élastoviscoplastique. Les résultats expérimentaux seront comparés aux résultats obtenus numériquement avec la loi viscoplastique de Herschel-Bulkley.

Ce papier sera organisé de la manière suivante:

- Dans une première partie, nous montrerons l'influence du confinement et de l'indice de la loi puissance sur nos écoulements.
- Nous examinerons l'influence du Reynolds sur la morphologie d'un fluide viscoplastique, dans une seconde partie.
- Et enfin, dans une troisième partie, nous nous intéresserons à l'influence du nombre d'Oldroyd sur l'apparition des différents régimes et sur la morphologie des écoulements.

2 Théorie et approche numérique

Le problème considéré est celui de l'écoulement 2-D d'un fluide incompressible viscoplastique autour d'un cylindre (Fig. 1). La vitesse du fluide à l'infini est désignée V_∞ et on suppose que le fluide adhère à la paroi du cylindre. D'un point de vue numérique, les équations de conservation de la masse et de conservation de la quantité de mouvement sont utilisées pour résoudre notre problème. Les résultats ont été obtenus à l'aide du code de calcul Fluent (Ansys Fluent). Pour plus de détails sur les calculs numériques, voir Mossaz et al [8].

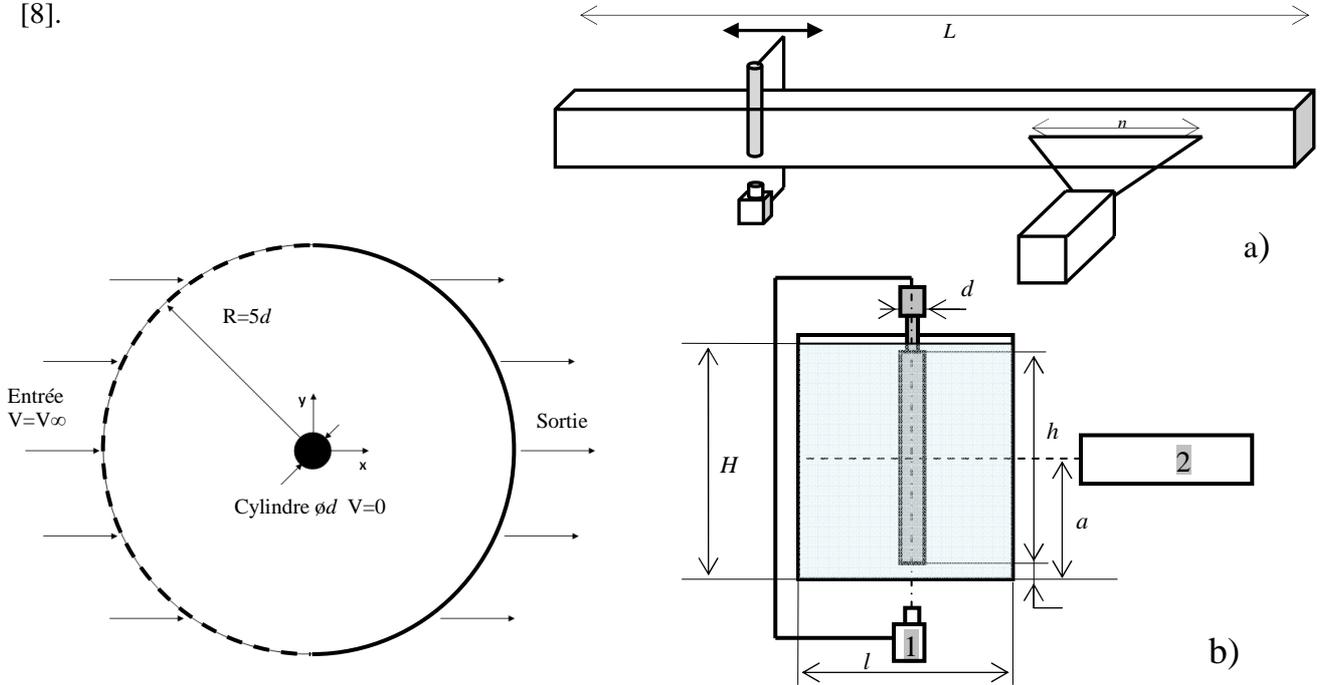


FIG. 1 : Schéma de l'écoulement FIG.2 : Dispositif expérimental : a)vue globale, b)vue de gauche
1 : Caméra ; 2 : Nappe laser

Les fluides à seuil (Carbopol® 940) utilisés dans cette étude ont un comportement élastoviscoplastique. Le modèle rhéofluidifiant élastoviscoplastique présenté par Piau [9] et Piau et Debiane [10] sera utilisé pour obtenir les caractéristiques rhéologiques du gel. Celui-ci est donné par :

$$\begin{cases} \underline{\underline{\tau}} = 2 \left(K \dot{\underline{\underline{\gamma}}}^{(n-1)} + \frac{\tau_0}{\dot{\underline{\underline{\gamma}}}} \right) \dot{\underline{\underline{\gamma}}} & \text{si } \tau > \tau_0 \\ \underline{\underline{\tau}} = G \underline{\underline{\gamma}} & \text{si } \tau \leq \tau_0 \end{cases} \quad (1)$$

L'écoulement peut donc être caractérisé par quatre nombres adimensionnels : l'indice de rhéofluidification n , le nombre d'Oldroyd Od (effet du seuil), le nombre de Reynolds Re (effet de l'inertie) et le nombre de Weissenberg We (effet de l'élasticité).

$$Od = \frac{\tau_0}{K(V_\infty/d)^n} \quad Re = \frac{\rho V_\infty^{2-n} d^n}{K} \quad We = \frac{\lambda}{(V/d)} \quad \text{avec} \quad \lambda = (K/G')^{1/n} \quad (2)$$

On définira aussi Re_c et Re^c , comme étant les nombres de Reynolds critiques entre respectivement le régime rampant et le régime recirculant, et, entre le régime recirculant et le régime instationnaire, avec lâché de tourbillons.

3 Système expérimental

Le dispositif expérimental utilisé est présenté sur la Figure 2. Celui-ci est constitué d'un canal en Plexiglas®, de longueur $L=3500\text{mm}$, de largeur $l=200\text{mm}$ et d'une hauteur $H=220\text{mm}$, et d'un barreau cylindrique, situé sur l'axe de symétrie de la cuve, de hauteur $h=200\text{mm}$ et de diamètre $d=19\text{mm}$.

Le système de visualisation est composé d'un appareil photo numérique Casio EX-F1 et du laser (Spectra Millénia II) développant une puissance de 2 watts. Un barreau optique est placé devant le laser et permet l'obtention d'une nappe de largeur $n \approx 1$ m. Les fluides utilisés ont étéensemencés de billes de verre creuses et argentées de diamètre 20 μ m et qui servent de marqueurs. L'obstacle cylindrique a été recouvert d'un papier rugueux P120 (250 μ m) afin de s'assurer du non glissement à la paroi [11-12].

4 Matériel et rhéométrie

Le premier fluide utilisé, servant de référence newtonienne, est une solution de glucose de viscosité $\eta = 0.913e^{-0.064T}$ Pa.s avec T la température en °C. Les gels utilisés sont obtenus par dissolution du polymère Carbopol® 940 (fabriqué par Goodrich B. F.) dans de l'eau déminéralisée. Nous obtenons des gels stables de polymère ayant un comportement élastoviscoplastique rhéofluidifiant. Les caractéristiques rhéologiques de ces fluides ont été obtenues à l'aide du rhéomètre TA Instruments (AR-G2), de résolution angulaire 2.5×10^{-8} rad et de résolution sur le couple de 10^{-10} Nm. Le tableau 1 fournit les paramètres obtenus à la suite d'un ajustement des données avec l'équation d'Herschel-Bulkley.

	τ_0 (Pa)	K (Pa.s ⁻ⁿ)	n	G' (Pa)	G'' (Pa)	λ (s)	Concentration
Newtonien	0	0.25	1				
Gel 1	1.88	1.46	0.42	27	3	0.001	0.076
Gel 2	0.99	1.24	0.42	12	2.5	0.0045	0.067

Tableau 1: Caractéristiques rhéométriques des différents fluides

5 Résultats

5.1 Fluide newtonien

Afin de valider notre dispositif expérimental, une étude a été réalisée en utilisant la solution de glucose.

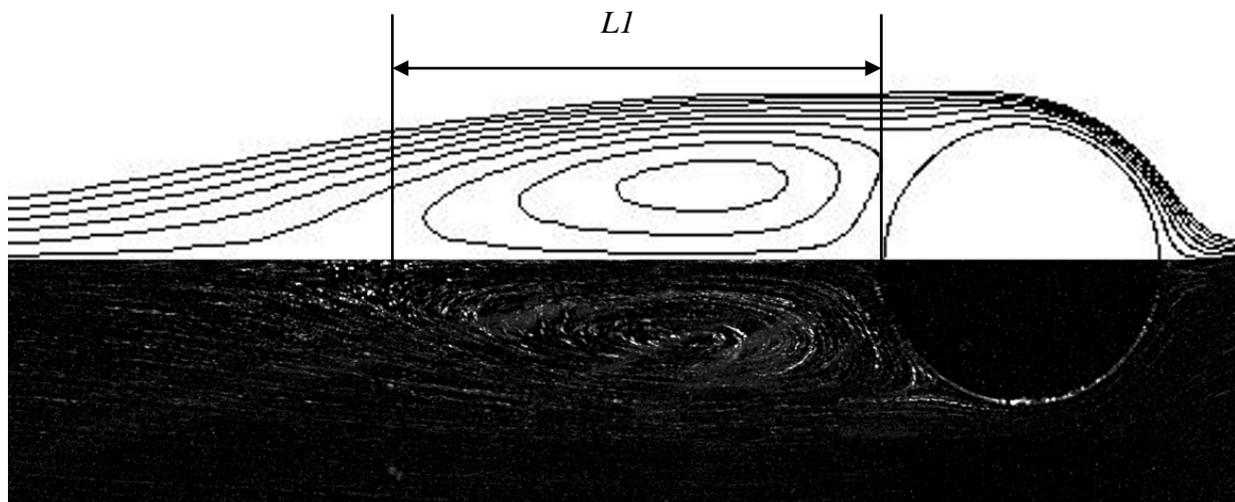


FIG. 3 : Comparaison à $Re=32$ pour la solution de glucose.

La figure 3 présente une comparaison des lignes de courant obtenues de manière numérique et expérimentale pour un nombre de Reynolds de 32. Cette comparaison a été réalisée pour des nombres de Re jusqu'à 50. Nous avons aussi comparé la longueur LI , correspondant à la longueur de la recirculation, à différents résultats de la littérature. Une bonne corrélation a été obtenue, permettant ainsi la validation de notre installation expérimentale.

5.2 Fluide viscoplastique

5.2.1 Influence du confinement et de l'indice n

L'effet du confinement et de l'indice de la loi puissance a été examiné pour différents écoulements pouvant apparaître dans notre expérimentation. La figure 4 montre numériquement l'effet du confinement sur trois fluides, un fluide newtonien et deux fluides à seuil ayant respectivement un $Od=0.2$ et 0.5 . Le rapport de confinement est noté $d/dinf$ avec $dinf$ la largeur du canal. Les courbes des Reynolds critiques sont obtenues en reliant les différentes valeurs des Reynolds critiques de chaque écoulement. L'effet du confinement sur les longueurs caractéristiques est marqué : à Reynolds identique, plus le confinement est élevé plus les longueurs caractéristiques sont élevées. Enfin, on peut noter que l'effet du confinement ne semble pas être affecté par le seuil, celui-ci ayant le même effet pour un écoulement où $Od=0$ et $Od=0.5$. On peut aussi constater que le confinement a tendance à stabiliser l'écoulement avec une augmentation des Reynolds critiques.

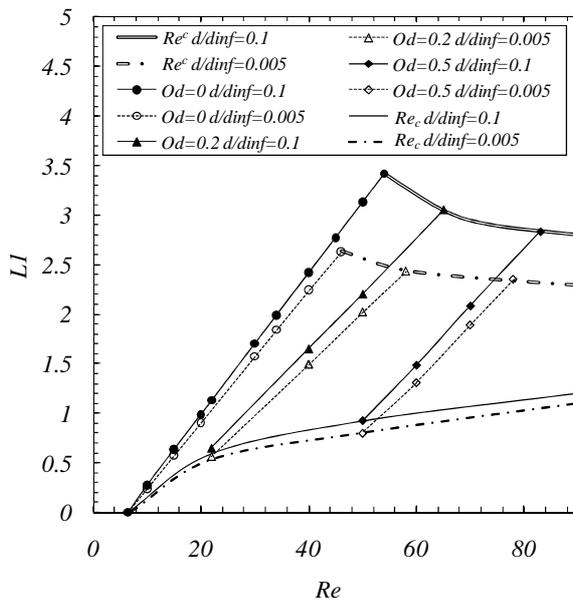


FIG. 4 : Influence du confinement

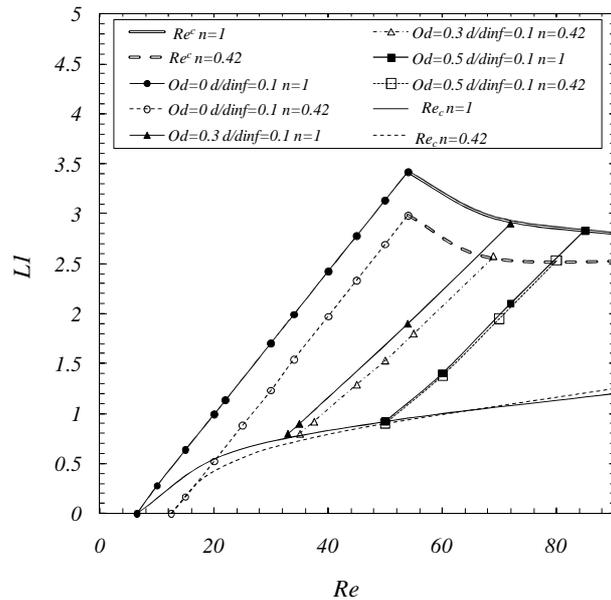


FIG. 5 : Influence du n

La figure 5 montre l'effet de l'indice de la loi puissance avec une comparaison entre des écoulements où $n=1$ et $n=0.42$. Les courbes Re_c et Re^c sont obtenues de la même manière que pour la figure 4. Cette effet est fonction du nombre d'Oldroyd. Pour $Od=0$, LI décroît lorsque n passe de $n=1$ à $n=0.42$ comme montré par Sivakumar et al [13]. Par contre, cette décroissance se réduit lorsque Od augmente, jusqu'à devenir inexistante pour $Od=0.5$. L'influence de n sur l'apparition des différents régimes est elle aussi fonction du Od . Pour $Od=0$, la diminution de n fait augmenter le Re_c de 6 à 13 alors qu'elle ne varie pas pour un $Od=0.5$. La même remarque peut être faite sur Re^c .

5.2.2 Influence du nombre de Reynolds

Lorsqu'un fluide viscoplastique s'écoule autour d'un cylindre, différentes morphologies d'écoulement peuvent être observées en fonction du nombre de Reynolds [14]. La figure 6 en présente 2. Les zones noires (obtenues expérimentalement) et grisées (obtenues numériquement) correspondent aux zones rigides pour lesquelles $\tau \leq \tau_0$ (voir le modèle d'Herschel-Bulkley). La figure 6a montre le cas d'un écoulement à faible Reynolds dans le régime rampant pour le gel 1 $Re=24$ $Od=0.38$ $n=0.42$ et $We=0.018$. On observe une zone rigide située à l'arrière du cylindre.

En augmentant le Reynolds (Fig. 6b, gel1 $Re=35$ $Od=0.34$ $n=0.42$ et $We=0.023$), l'écoulement entre dans le régime recirculant, une recirculation apparaît derrière le cylindre. Les zones rigides se scindent en six : trois zones rigides statiques et trois zones rigides mobiles (voir Mossaz et al[4] pour plus de précisions). La taille de ces zones évolue en fonction du Reynolds (voir Fig 6c, gel1 $Re=45$ $Od=0.32$ $n=0.42$ et $We=0.027$). On peut remarquer sur cette figure une relativement bonne corrélation entre les résultats expérimentaux et numériques.

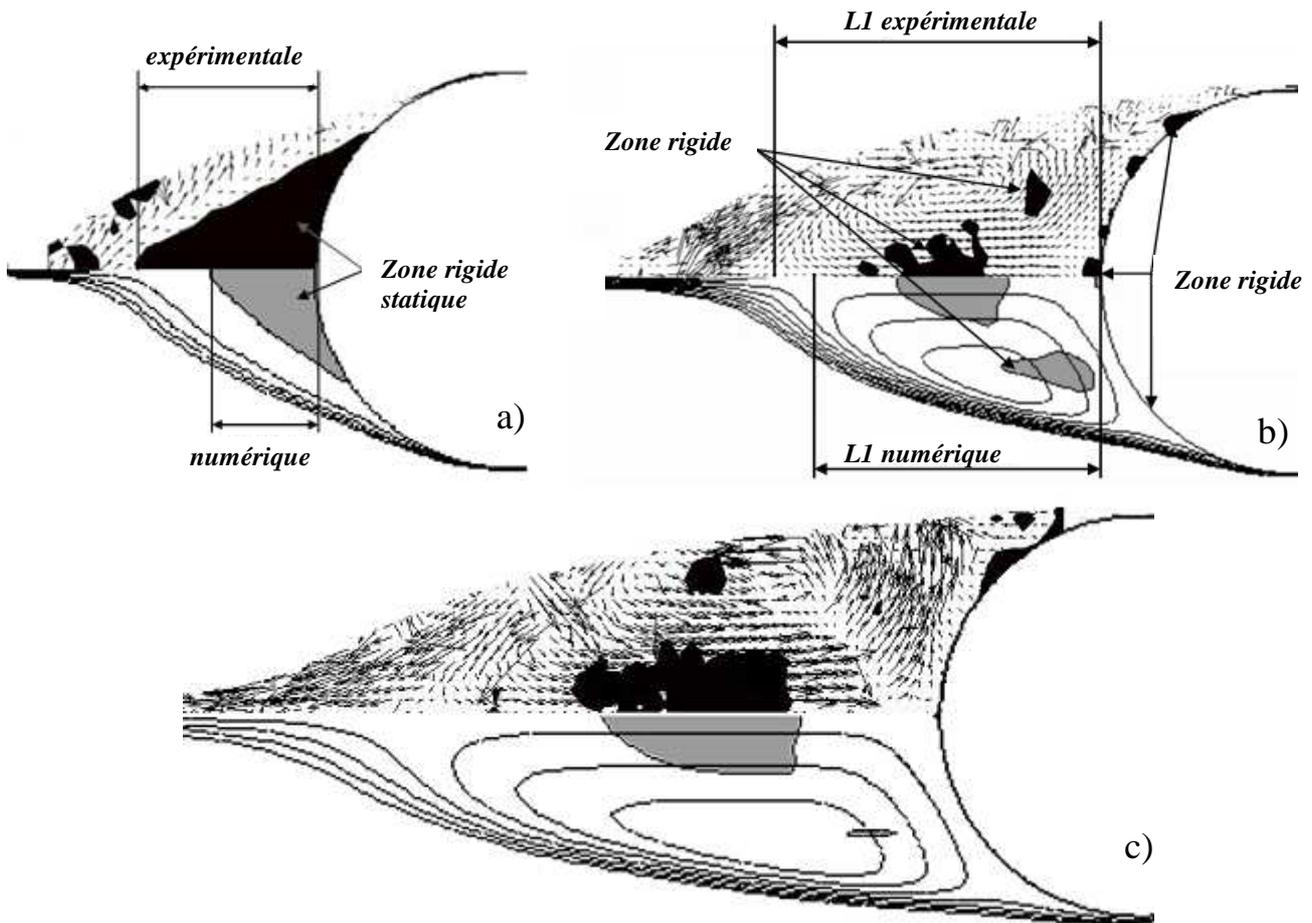


FIG. 6 : Influence du nombre de Reynolds sur la morphologie de l'écoulement

5.2.3 Influence du nombre d'Oldroyd

Les valeurs des nombres de Reynolds critiques, entre l'écoulement rampant et recirculant (Re_c) et entre l'écoulement recirculant et instationnaire (Re^c) obtenues expérimentalement et numériquement sont présentées sur les Tableaux 2 et 3.

Re_c	Experimentale	$d/d_{inf}=0.005$ $n=1$	$d/d_{inf}=0.1$ $n=1$	$d/d_{inf}=0.005$ $n=0.42$	$d/d_{inf}=0.1$ $n=0.42$
Fluide newtonien	5	7	8	11.5	13
Gel 1 ($Od \approx 0.34$)	35	27	28	32	33
Gel 2 ($Od \approx 0.24$)	24	23	24	25	26

Tableau 2 : Re_c pour les différents cas étudiés.

Re^c	Experimentale	$d/d_{inf}=0.005$ $n=1$	$d/d_{inf}=0.1$ $n=1$	$d/d_{inf}=0.005$ $n=0.42$	$d/d_{inf}=0.1$ $n=0.42$
Fluide newtonien	50	47	55	47	55
Gel 1 ($Od \approx 0.29$)	67	66	75	60	70
Gel 2 ($Od \approx 0.19$)	62	60	69	55	64

Tableau 3 : Re^c pour les différents cas étudiés.

L'influence du nombre d'Oldroyd sur la limite des différents régimes est bien identifiable. Plus le seuil est élevé plus l'inertie doit être importante pour retrouver une morphologie d'écoulement similaire. Le seuil a un effet stabilisant sur l'écoulement

On constate aussi, comme sur la figure 4 une augmentation des nombres de Reynolds critiques avec le confinement et une influence de l'indice n fonction du Od . On constate aussi une bonne corrélation entre nos résultats expérimentaux et numériques.

6 Conclusion

Dans cet article, nous avons étudié l'écoulement inertiel d'un fluide à seuil de contrainte autour d'un obstacle cylindrique de manière expérimentale et numérique. Le fluide à seuil de contrainte utilisé est un gel de Carbopol à comportement élastoviscoplastique rhéofluidifiant.

Il a été montré que :

- Le confinement retarde l'apparition du régime laminaire avec recirculation ainsi que l'apparition du régime avec détachement de tourbillons et fait augmenter les longueurs caractéristiques.
- L'influence de l'indice de rhéofluidification dépend du nombre d'Oldroyd. Pour $Od < 0.5$, les longueurs caractéristiques décroissent lorsque n diminue.
- Le seuil a un effet stabilisant sur l'écoulement. Les régimes recirculant et instationnaire avec détachement de tourbillons sont obtenus pour des nombres de Reynolds plus élevés lorsque l'on augmente le seuil de contrainte.

Références

- [1] A. Putz, I.A. Frigaard, Creeping flow around particles in a Bingham fluid. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 165 (2010) 263-280.
- [2] G.R. Burgos, A.N. Alexandrou, V. Entov, On the determination of yield surfaces in Herschel–Bulkley fluids, *J.Rheol.* 43 (1999) 463–483
- [3] E. Mitsoulis, On creeping drag flow of a viscoplastic fluid past a circular cylinder: wall effects, *Chem. Eng. Sci.* 59 (2004) 789–800.
- [4] D.D. Atapattu, R.P. Chhabra and P.H.T. Uhlherr, Creeping sphere motion in Herschel–Bulkley fluids: flow field and drag, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 59 (1995), 245–265.
- [5] L. Jossic and A. Magnin, Drag and stability of objects in a yield stress fluid, *AIChE J.* 47 (2001), 2666–2672.
- [6] O. Merkak, L. Jossic and A. Magnin, Spheres and interactions between spheres moving at very low velocities in a yield stress fluid, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 133 (2006), 99–108.
- [7] D. L. Tokpavi, A. Magnin, P. Jay, Very slow flow of Bingham viscoplastic fluid around a circular cylinder. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 154 (2008) 65-76.
- [8] S. Mossaz, P. Jay, A. Magnin, Criteria for the appearance of recirculating and non-stationary regimes behind a cylinder in a viscoplastic fluid, *J. of Non-Newtonian Fluid Mech.* 165 (2010) 1525-1535.
- [9] J.M. Piau, Viscoplastic boundary layer, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 102 (2002), pp. 193–218.
- [10] J.M. Piau and K. Debiante, The adhesive or slippery flat plate viscoplastic boundary layer for a shear-thinning power-law viscosity, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 117 (2004), pp. 97–107.
- [11] A. Magnin and J.M. Piau, Cone-and-plate rheometry of yield stress fluids. Study of an aqueous gel, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 36 (1990), 85–108.
- [12] A. Magnin and J.M. Piau, Measurement of very low strains using a stress rheometer: a new rotating sensing transducer (RST), *J. Rheol.* 35 (1991), 1465–1479.
- [13] P. Sivakumar, R.P. Bharti, R.P. Chhabra, Effect of power-law index on critical parameters for power-law flow across an unconfined circular cylinder. *Chemical Engineering Science* 61(2006) 6035–6046.
- [14] C.H.K. Williamson, Vortex dynamics in the cylinder wake, *Annual Review of Fluid Mechanics* 28 (1996) 477–539.