

Influence du glissement sur l'écoulement d'un fluide viscoplastique autour d'une plaque plane

F. AHONGUIO, L. JOSSIC, A. MAGNIN

Laboratoire Rhéologie et Procédés, UMR 5520, Université Grenoble Alpes
CNRS, LRP, Grenoble F-38000, France
Email : laurent.jossic@grenoble-inp.fr

Résumé

Cette étude expérimentale s'intéresse à l'influence du glissement sur l'écoulement non-inertiel d'un fluide viscoplastique autour d'une plaque plane se déplaçant à vitesse constante. La force de traînée subie par la plaque a été analysée en fonction de la vitesse et des conditions interfaciales : adhérence et glissement. Les champs cinématiques ont également été déterminés par une analyse PIV. Ces champs ont permis de caractériser l'influence de la vitesse et des conditions interfaciales sur les régions liquide et solide de l'écoulement. Les contraintes pariétales le long de la plaque et les vitesses de glissement issues de la PIV ont ensuite été comparées aux mesures rhéométriques.

Abstract

This experimental study deals with the influence of slip on the non-inertial flow of a viscoplastic fluid around a flat plate moving at a constant velocity. The drag force undergone by the plate has been analyzed with regards to the velocity and for two interfacial conditions : adherence and slip. The kinematic fields have also been measured by a PIV analysis. These fields have enabled to determine the influence of both the velocity and the interfacial conditions on the liquid and solid regions of the flow. The wall shear stresses along the plate and the slip velocities provided by PIV are then compared to the rheometrical measurements.

Mots clés : champ de vitesse, coefficient de traînée, couche limite, fluide à seuil, glissement, plaque.

1. Introduction

Les écoulements de fluides complexes autour d'obstacles interviennent dans de nombreux procédés industriels. En particulier, la mise en œuvre des fluides à seuil nécessite une meilleure compréhension des phénomènes pour mieux répondre aux besoins industriels. Dans ce contexte, des études ont été effectuées pour caractériser les écoulements de fluides viscoplastiques autour d'objets tels que la sphère, le cylindre, le disque ou encore le cône. Toutefois, selon l'obstacle considéré, de nombreuses lacunes et disparités persistent. La présente étude s'intéresse à l'écoulement d'un fluide viscoplastique le long d'une plaque plane. Cette configuration a déjà été analysée dans la

littérature [1-8]. Oldroyd [1-2] fut le premier à s'y intéresser d'un point de vue théorique. En utilisant un modèle de Bingham, il montre qu'aux grands nombres d'Oldroyd¹, le fluide est rigide partout excepté dans une fine couche où coexistent aussi bien les effets visqueux que les effets plastiques. Les études d'Oldroyd ont été remises en question par les études analytiques de Piau [3] et Piau et Debiane [4] qui analysent les évolutions du coefficient de traînée et de la couche limite à l'aide du modèle de Herschel-Bulkley en prenant en compte les conditions interfaciales. Ils prédisent que l'épaisseur de la couche limite à mi-hauteur de la plaque augmente avec la longueur de la plaque et avec la vitesse d'écoulement. Récemment, le déplacement d'une plaque dans un fluide à seuil a été étudié expérimentalement [5-7]. Les mesures [5-6] ont porté sur la force de traînée au cours du déplacement de la plaque et sur les champs et les profils de vitesse. Pour une large gamme de vitesse, les auteurs observent une faible variation de l'épaisseur de la couche limite avec la vitesse ; un résultat qui contredit la théorie de Piau et Debiane [4]. En outre, Boujlel et Coussot [5] révèlent aussi une réversibilité de l'écoulement en ce sens qu'ils obtiennent les mêmes propriétés d'écoulement aussi bien en enfonçant qu'en retirant la plaque. Parallèlement, Ferreira et al. [8] ont récemment analysé l'écoulement non inertiel d'un matériau élasto-viscoplastique autour d'une lame. Dans cette analyse numérique, ils observent un changement de la forme des régions seuilées et non seuilées au voisinage de la lame avec l'élasticité ainsi qu'une diminution de l'étendue des régions non seuilées suite à une augmentation de la vitesse.

Ce travail se propose d'analyser expérimentalement l'influence du glissement sur l'écoulement d'un fluide viscoplastique modèle, le long d'une plaque plane, sujet peu étudié jusqu'à présent [3]. L'étude a été effectuée avec deux plaques carrées de 5 cm de côté et 0.5 mm d'épaisseur : une plaque adhérente de rugosité supérieure à la taille caractéristique des micro-gels constitutifs du fluide utilisé et une plaque lisse en PMMA, matériau hydrophobe dont la faible rugosité et l'hydrophobicité accentuent le glissement du fluide. Les vitesses considérées sont suffisamment faibles pour que les effets inertiels puissent être négligés devant les effets visqueux, eux-mêmes négligeables devant les effets plastiques. L'étude porte sur l'influence de la vitesse et des conditions interfaciales sur le coefficient de traînée et les champs cinématiques.

2. Matériau et contexte de l'étude

Le fluide utilisé est un gel aqueux de polymère, le Carbopol 940 produit par BF Goodrich [9]. Il est constitué d'une suspension de micro-gels déformables gonflés de solvant. Son seuil provient de l'empilement spatial des micro-gels dont la taille varie entre 2 et 20 μm [10]. Piau [10] et Dimitriou et al. [11] décrivent de manière assez exhaustive les données du gel de Carbopol. Ce gel est caractérisé par son comportement viscoplastique et non thixotrope [10-13], sa stabilité dans le temps et par sa transparence. Le gel utilisé pour les visualisations a étéensemencé de micro-particules creuses argentées. Le comportement du gel a été caractérisé en volume et en présence de glissement par des essais de cisaillement simple réalisés sur le rhéomètre ARES de TA Instruments, à température et à évaporation contrôlées. Le comportement en volume a été caractérisé avec une géométrie cône – plan aux surfaces rugueuses et le comportement en glissement avec une géométrie plan – plan dont l'un des plans est rugueux et l'autre lisse, en PMMA. Durant les mesures, les vitesses de glissement ont été également déterminées à la surface de la plaque lisse en visualisant la déformation d'un marqueur à la surface libre du gel [14]. Le comportement en volume peut être décrit par le modèle de Herschel-Bulkley complété par le modèle de Hooke :

¹ Nombre d'Oldroyd : Noté Od , il représente le ratio entre les effets plastiques et les effets visqueux [3].

$$\begin{cases} \underline{\underline{\tau}} = 2 \left(\frac{\tau_0}{\sqrt{-4D_{II}}} + K\sqrt{-4D_{II}}^{n-1} \right) \underline{\underline{D}} & \text{si } -\tau_{II} > \tau_0^2 \\ \underline{\underline{\tau}} = 2G\underline{\underline{\varepsilon}} & \text{si } -\tau_{II} \leq \tau_0^2 \end{cases} \quad (1)$$

où τ_0 , K et n représentent respectivement la contrainte seuil, la consistance et l'indice de rhéofluidification. G désigne le module de cisaillement élastique, $\underline{\underline{\varepsilon}}$ le tenseur des déformations, $D_{II} = -\frac{1}{2} \text{tr} \underline{\underline{D}}^2$ et $\tau_{II} = -\frac{1}{2} \text{tr} \underline{\underline{\tau}}^2$ étant respectivement les seconds invariants des tenseurs des taux de déformations $\underline{\underline{D}}$ et de contraintes $\underline{\underline{\tau}}$. La loi de glissement peut être décrite par la loi proposée par Meeker et al. [15] :

$$U_s = U^* \left(\frac{\tau - \tau'_s}{\tau_0 - \tau'_s} \right)^{1/m} \quad (2)$$

avec U^* une vitesse caractéristique dépendant des propriétés du gel, τ'_s et m deux paramètres liés aux propriétés interfaciales.

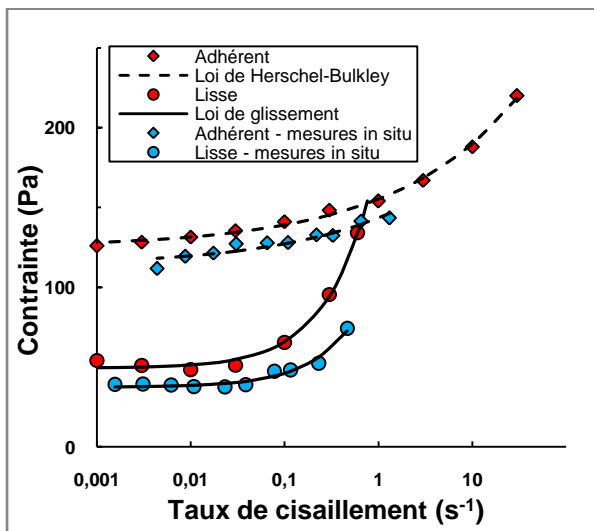


Figure 1 : Courbes d'écoulement

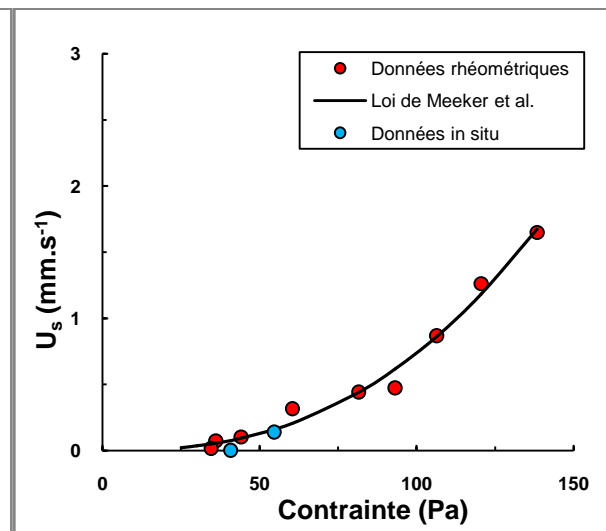


Figure 2 : Loi de glissement

Les figures 1 et 2 représentent respectivement les courbes d'écoulement et la loi de glissement du gel utilisé pour les mesures de forces. Elles permettent d'identifier les paramètres des équations 1 et 2. Les données en rouge proviennent d'essais rhéométriques quand celles en bleu ont été obtenues à partir des mesures de forces de traînée et de champs de vitesses détaillées dans la section 3. Les mesures rhéométriques de la figure 1 fournissent un seuil en volume de 126 Pa et un seuil de glissement de 49 Pa.

3. Résultats

3.1. Coefficients de traînée

La figure 3 représente l'évolution du coefficient de traînée en fonction du nombre d'Oldroyd pour les deux états de surface. Elle met en évidence une légère diminution du coefficient de traînée pour $Od \leq 40$. Cela est dû à une diminution des effets visqueux quand le nombre d'Oldroyd augmente ; ce qui se traduit par une réduction de la force de traînée. Par ailleurs, le coefficient de traînée tend vers un plateau au-delà de $Od = 40$. Ce plateau montre qu'aux très faibles vitesses, la force de traînée n'est plus gouvernée par la vitesse ; elle ne dépend plus que de la contrainte seuil et de la surface latérale.

Concernant l'influence des propriétés interfaciales, la figure 3 montre des coefficients de traînée plus élevés pour la plaque adhérente. L'écart avec le cas lisse est dû à la présence du glissement à l'interface plaque/fluide. Par ailleurs, le rapport des valeurs asymptotiques des coefficients de traînée est assez proche du rapport des contraintes seuil en volume et en glissement obtenues en rhéométrie. Il n'en est pas de même dans le cas de la sphère [16]. En effet, l'écoulement autour de la plaque est un écoulement de cisaillement 2-D similaire à celui du rhéomètre tandis que l'écoulement autour de la sphère est un écoulement 3-D avec une force de traînée qui comprend un terme de pression.

Les données de la figure 3 permettent de calculer les contraintes de cisaillement à la paroi en fonction de la vitesse, qui peuvent être comparées aux mesures issues de la rhéométrie. Celles-ci conduisent à des courbes d'écoulement (cf. figure 1) obtenues en divisant la vitesse par une longueur caractéristique qui dépend des propriétés interfaciales. La figure 1 montre une assez bonne cohérence entre les évolutions nonobstant quelques écarts dus aux incertitudes de mesures.

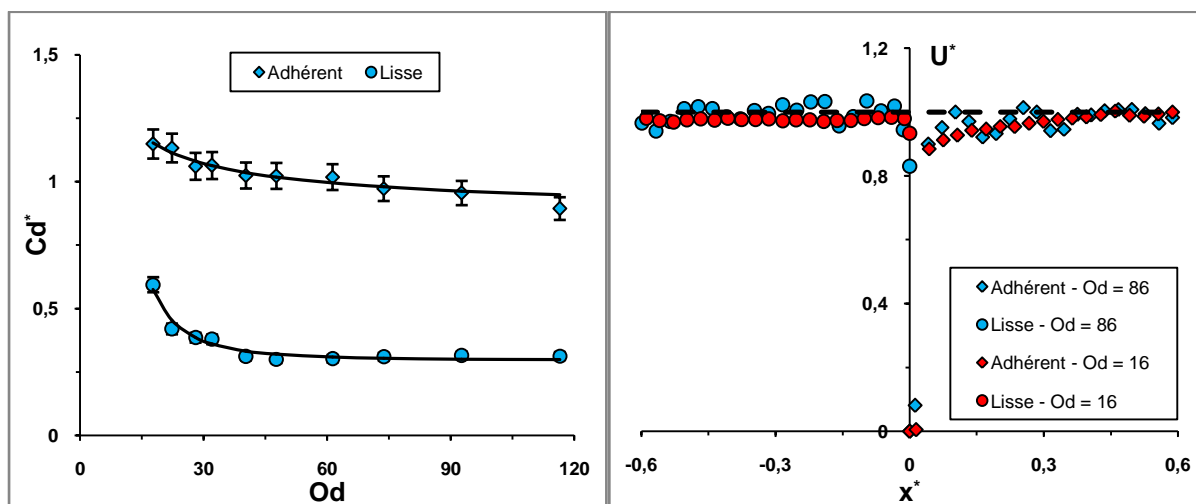


Figure 3 : Evolutions du coefficient de traînée Figure 4 : Profils de vitesse à mi-hauteur de la plaque

3.2. Champs et profils de vitesse

La figure 4 fournit les profils de vitesse à mi-hauteur des plaques pour deux nombres d'Oldroyd : 86 et 16, correspondant respectivement à $U = 1 \mu\text{m.s}^{-1}$ et $150 \mu\text{m.s}^{-1}$. Pour chaque type d'interface, ces profils sont assez proches l'un de l'autre en termes d'évolution et d'étendue des régions d'écoulement. Ceci confirme la faible influence du Od , i.e. de la vitesse, sur la morphologie de l'écoulement dans la gamme d' Od considérée, comme observé dans [5-6]. La vitesse de glissement est estimée à $0.83U$ pour $Od = 86$ et à $0.93U$ pour $Od = 16$. Par ailleurs, la figure 4 permet de distinguer deux régions d'écoulement dont les étendues dépendent des conditions interfaciales. La première est une région liquide dans laquelle le fluide est cisailé. Celle-ci part d'une vitesse nulle (resp. de glissement) à la paroi de la plaque adhérente (resp. lisse) et se termine quand la vitesse d'écoulement

est atteinte à une distance correspondant à l'épaisseur de la couche limite. Comme attendu, la couche limite est plus fine en présence du glissement. Le rapport de l'épaisseur des deux couches limites est de l'ordre de 4. La seconde région est une zone solide caractérisée par des gradients de cisaillement quasi-nuls dans laquelle le fluide se déplace à la vitesse d'écoulement.

Pour une analyse plus approfondie des régions d'écoulement, les champs du second invariant du tenseur des taux de déformation D_{II} ont été déterminés. La figure 5 montre que les gradients de vitesse observés près de la plaque adhérente sont plus grands que ceux observés près de la plaque lisse. En outre, la région liquide est caractérisée par des valeurs de D_{II} non nulles et est suivie de la région solide caractérisée par des valeurs de $D_{II} \leq 2.10^{-3} s^{-1}$. Avec ce critère, la région liquide dans le cas de la plaque adhérente est quasiment 2,5 fois plus étendue que la région liquide de la plaque lisse.

Les contraintes pariétales issues des mesures de forces et les vitesses de glissement mesurées in situ sur la plaque lisse fournissent des mesures indépendantes de la vitesse en fonction de la contrainte. Ces deux points reportés sur la figure 2 sont en accord avec la loi de glissement de Meeker et al. [15] déterminée en rhéométrie.

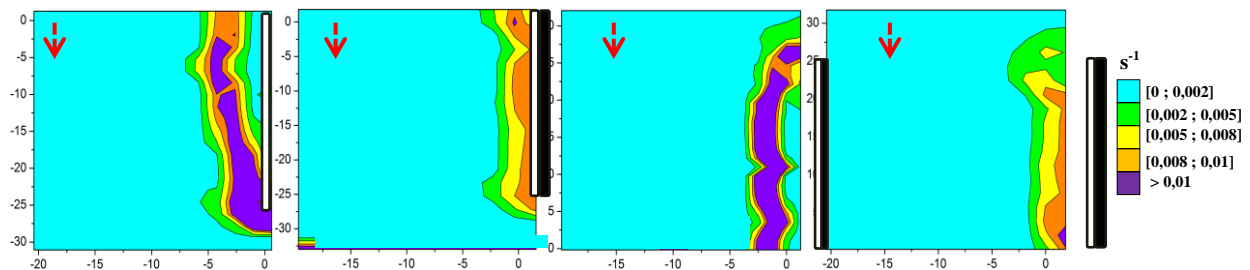


Figure 5 : Champs du second invariant du tenseur des taux de déformation à $Od = 16$ (de gauche à droite : aval : adhérent et lisse, amont : adhérent et lisse). La plaque est en blanc et l'ombre générée est représentée en noir.

4. Conclusion

Cette étude expérimentale porte sur l'écoulement d'un fluide à seuil autour d'une plaque plane avec ou sans glissement à la paroi. Elle met en particulier l'accent sur l'influence des conditions tribologiques à l'interface fluide/plaque aussi bien sur les coefficients de traînée que sur les champs de vitesse. Le glissement a été quantifié par une analyse rhéométrique et par des mesures de forces qui ont conduit à des ratios assez proches entre les coefficients de traînée asymptotiques et les seuils de contraintes. Par ailleurs, la visualisation de l'écoulement a permis de quantifier l'étendue et la forme des régions liquide et solide au voisinage des plaques. Il en ressort que l'étendue de la région liquide est globalement la même à l'avant et à l'arrière de chaque plaque et que cette étendue est plus grande dans le cas de la plaque adhérente. En outre, les profils de vitesse ont révélé la non-symétrie de l'écoulement indépendamment des propriétés interfaciales. De plus, les contraintes pariétales issues des mesures de forces et les vitesses de glissement issues des mesures cinématiques ont confirmé la loi de glissement obtenue en rhéométrie. Ces résultats montrent ainsi que l'écoulement autour d'une plaque plane peut servir de technique de mesure pour estimer les seuils d'écoulement en volume ainsi que les seuils de glissement.

Références

- [1] J.G. Oldroyd, A rational formulation of the equations of plastic flow for a Bingham fluid, Proc. Camb. Philos. Soc. 43 (1947) 100-105.
- [2] J.G. Oldroyd, Two-dimensional plastic flow for a Bingham fluid. A boundary-layer theory for slow motion, Proc. Camb. Philos. Soc. 43 (1947) 383-395.
- [3] J.-M. Piau, Viscoplastic boundary layer, J. Non-Newtonian Fluid Mech. 102 (2) (2002) 193-218.
- [4] J.-M. Piau, K. Debiane, The adhesive or slippery flat plate viscoplastic boundary layer for a shear-thinning power-law viscosity, J. Non-Newtonian Fluid Mech. 117 (2004) 97-107.
- [5] J. Boujlel, P. Coussot, Measuring yield stress : a new, practical, and precise technique derived from detailed penetrometry analysis, Rheol. Acta (2012).
- [6] J. Boujlel, M. Maillard, A. Lindner, G. Ovarlez, X. Chateau, P. Coussot, Boundary layer in pastes – Displacement of a long object through a yield stress fluid, J. Rheol. 56 (2012) 1083-1108.
- [7] T. Chevalier, S. Rodts, X. Chateau, J. Boujlel, M. Maillard, P. Coussot, Boundary layer (shear band) in frustrated viscoplastic flows, Europhys. Lett. 102 (2013) 48002-48007.
- [8] M.R.S. Ferreira, G.M. Furtado, L. Hermany, S. Frey, M.F. Naccache, P.R. de Souza Mendes, External flows of elasto-viscoplastic materials over a blade, Proc. of the ENCIT 2014, 15th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, November 10-13, 2014, Belém, PA, Brazil.
- [9] B.F. Goodrich Literature, Cleveland, 1997.
- [10] J.-M. Piau, Carbopol gels: elastoviscoplastic and slippery glasses made of individual swollen sponges, J. Non-Newtonian Fluid Mech. 144 (2007) 1-29.
- [11] C.J. Dimitriou, R.H. Ewoldt, G.H. McKinley, Describing and prescribing the constitutive response of yield stress fluids using large amplitude oscillatory shear stress (LAOStress), J. Rheol. 57 (1) (2013) 27-70
- [12] P.C.F. Møller, A. Fall, D. Bonn, Origin of apparent viscosity in yield stress fluids below yielding, Europhys.Lett. 87 (2009) 38004 (1-5).
- [13] P.C.F. Møller, A. Fall, V. Chikkadi, D. Derks, D. Bonn, An attempt to categorize yield stress fluid behavior, Philos. Trans. Roy. Soc. A 367 (2009) 5139-5155.
- [14] A. Magnin, 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.
- [15] S.P. Meeker, R.T. Bonnecaze, M. Cloitre, Slip and flow in soft particle pastes, Phys. Rev. Lett. 92 (19) (2004) 198302 (1-4).
- [16] F. Ahonguio, L. Jossic, A. Magnin, Influence of surface properties on the flow of a yield stress fluid around spheres, J. Non-Newtonian Fluid Mech. 206 (2014) 57-70.