



Réduction de la traînée avec une solution de CTAC-NaSal : Étude du glissement à la paroi en géométrie de Couette

Drag reduction with an aqueous solution of CTAC-NaSal: Study of the wall slip with a Couette geometry

Ferhat Hadri*, Anthony Besq, Sylvain Guillou, Rachid Makhoulfi

LUSAC – EA4253 – Université de Caen, rue Louis-Aragon, BP 78, 50130 Cherbourg-Octeville, France

INFO ARTICLE

Historique de l'article :

Reçu le 30 octobre 2009

Accepté après révision le 22 février 2010

Disponible sur Internet le 1^{er} avril 2010

Mots-clés :

Mécanique des fluides

Tensioactifs

CTAC-NaSal

Réduction de la traînée

PIV

Glissement à la paroi

Keywords:

Fluid mechanics

Surfactant

CTAC-NaSal

Drag reduction

PIV

Wall slip

RÉSUMÉ

Les solutions de tensioactifs comme celles du CTAC (cetyltrimethyl ammonium chloride) mélangées à du sel stabilisateur NaSal (sodium salicylate) conduisent à une importante réduction de la perte de la charge en régime turbulent. L'écoulement en proche paroi, dans une géométrie de Couette à large entrefer, d'une solution de ce tensioactif dosée à 75 ppm a été étudié par la technique de vélocimétrie par image de particules. Les résultats de cette étude confirment le pouvoir réducteur de la traînée de cette solution mais écartent l'hypothèse du glissement à la paroi évoquée comme une origine possible du phénomène de la réduction de la traînée.

© 2010 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

A B S T R A C T

The mixture of surfactants in solution state, such as CTAC (cetyltrimethyl ammonium chloride), with a stabilizer NaSal salt (sodium salicylate) decreases the lost of hydraulic charge in turbulent regime. The near wall flow in a wide gap Couette cell for an aqueous solution of this surfactant dosed at 75 ppm has been investigated by using particle image velocimetry. Results put forth that the drag reducing phenomenon exists with no evidence of wall slip.

© 2010 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abridged English version

Drag reduction by additives is a physical phenomenon which induces a significant reduction of friction under a turbulent flow (up to 80% of drag reduction). The drag reduction with the aqueous solution of cetyltrimethyl ammonium chloride (CTAC) dosed at 75 ppm mixed with sodium salicylate (NaSal) of identical weight, was investigated by Hadri [9] in a pipe. It appears that this solution leads to a reduction of the wall-friction and to a modification of the turbulence structures. The elongational viscosity [3] or the elasticity [4] is usually proposed to explain this effect with polymer solutions. In the case of a surfactant aqueous solution, although these same theories are proposed, some experimental results show that they cannot

* Auteur correspondant.

Adresses e-mail : ferhat.hadri@unicaen.fr (F. Hadri), anthony.besq@unicaen.fr (A. Besq), sylvain.guillou@unicaen.fr (S. Guillou), rachid.makhoulfi@unicaen.fr (R. Makhoulfi).

be considered as universal. Indeed, some drag reducing solutions are neither viscoelastic fluid nor present elongational viscosity [2,5]. Therefore, other hypotheses have been addressed such as local shear-thickening [10] or wall slip [7].

Here we report a study of quantification of the wall slip in the drag reduction phenomenon, which is made by flowing water and a very low concentrated aqueous solution of CTAC/NaSal (dosed at 75 ppm) in a wide gap (22.5 mm) Couette geometry for rotating speed of the inner cylinder from 170 to 700 rpm (turbulent flow). Important drag reduction has been already reported by Hadri [8,9] for pipe flow experiments with this solution. The two cylinders of the Couette set-up are fixed on a controlled stress rheometer (Rheoscope, ThermoFisher). The dissipated power calculation based on torque measurements shows a decreasing Reynolds number Re dependence, which is analogous of the Re dependence of the friction factor in pipe flow [14]. The external cylinder is machined in a polymethylmethacrylate (PMMA) bloc so that the particle image velocimetry (PIV, LaVision GmbH) could be used to monitor the velocity profiles within the gap of the Couette cell. Melamine particles ($d = 2.81 \mu\text{m}$) dyed with rhodamine 6B are used to seed the flow. Only the fluorescence signal induced by the rhodamine 6B is kept in our PIV measurements in order to avoid light reflection at the wall. Statistical analysis of the final velocity field (U_r, U_θ) expressed in polar coordinates is obtained by using the adaptative cross correlation technique (16×16 pixel windows with 50% overlapping) and 400 double frames.

Radial ($U_{r-RMS} = \sqrt{\sum(u_r')^2}$) and tangential turbulent intensities ($U_{\theta-RMS} = \sqrt{\sum(u_\theta')^2}$) presented, respectively, for tap water and the surfactant solution in Figs. 1 and 2, confirm the turbulent flow and the drag reducing effect. Indeed, radial turbulent intensities for the surfactant flow are drastically reduced in comparison with those obtained with water [2].

For both fluids (Figs. 1c and 1d), non-dimensionalized tangential velocity profiles (U_θ/U_{Rot}) present three major stable zones inside the gap with different velocity gradient magnitude depending on the fluid. The zone located in the middle of the gap (about 80% of the width of the gap) is characterized by a weak velocity gradient. The two other zones near the walls present important velocity gradient. The magnitude is especially important near the moving wall and increases for the drag reducing flow. For each fluid, the velocity profiles are quite similar for the different rotating speed. Nevertheless, stabilization of the velocity profile is observed for the surfactant only for rotating speed beyond to 500 rpm. The main fact concerns the shift between the controlled tangential velocities of the wall of the rotating cylinder and the ones found with measurements. The shift is about 20% for the water flow and increases to 60% for the drag reducing flow with the surfactant. As wall slip phenomena could not occur for water flow, these results put forth that spatial resolution is required for PIV measurements of high velocity gradient flow. Consequently, new measurements focused on the area near the wall of the rotating cylinder have been made (Figs. 1d and 2d).

A drastical reduction of the shift is obtained. The extension of the tangential velocity profile toward the wall shows that there is no slip for the water flow. With the surfactant solution, the shift is reduced to 10%, but the extension of the tangential velocity profile, which is steeper in this case, seems to converge to the wall velocity value of the rotating cylinder. We can thus assume that wall slip does not occur for drag reducing flow with CTAC.

In conclusion of this study, we have shown that a rigorous experimental design based on wide gap Couette geometry can be used to study the mechanism of drag reduction by additives. The effect of the wall slip which was first suspected as a major effect in the drag reducing phenomenon seems to be pulled away in the case of the drag reducing solution of CTAC/NaSal dosed at 75 ppm.

1. Introduction

Dans les écoulements en conduite, une partie de la puissance de pompage est utilisée pour vaincre le frottement à la paroi (accru en régime turbulent). Une réduction de ce frottement peut être obtenue par modification des propriétés physico-chimiques du fluide en écoulement. Ainsi, l'ajout de très petites quantités de certains polymères ou tensio-actifs dans de l'eau conduit à une réduction significative du frottement à la paroi en régime turbulent [1]. Cette réduction peut atteindre jusqu'à 80% comparé à l'eau pure.

Les additifs réducteurs de traînée sont principalement des polymères (s'agrégeant en macromolécules) et des tensio-actifs (s'agrégeant en micelles) en solution. Il apparaît que seuls les agrégats ayant un très grand rapport d'aspect et une flexibilité élevée sont efficaces pour réduire la traînée [2]. La réduction se produit en régime turbulent lorsque la solution est soumise à un fort taux de déformation. Ceci laisse à penser que le phénomène est dû à une interaction entre les agrégats et les structures de la turbulence, comme un alignement des agrégats avec l'écoulement moyen. Ces solutions présentent des caractéristiques rhéo-fluidifiantes, rhéo-épaississantes ou viscoélastiques, et subissent ou non les effets de l'élongation.

En ce qui concerne les solutions de tensioactifs, certaines présentent un rhéo-épaississement local (shear-induced state), d'autres ont un comportement rhéologique à peine différent de celui de l'eau. Pour expliquer le comportement réducteur de la traînée de ces systèmes, les deux hypothèses proposées pour les solutions de polymères, sont reprises. La première considère que la viscosité élongationnelle, due à l'étirement des chaînes moléculaires, et son impact en proche paroi, est la cause première du phénomène [3]. La seconde postule que c'est l'énergie élastique emmagasinée dans les macromolécules [4]. Pour les solutions de tensio-actifs, ces deux idées sont reprises. Cependant, pour Gyr et Bewersdorff [2], la viscosité élongationnelle a un effet mineur. D'autre part, toutes les solutions de tensio-actifs réductrices de traînée ne présentent pas de caractères viscoélastiques [5], et pourtant elles présentent des taux importants de réduction (jusqu'à 80%). Ainsi l'effet du rhéo-épaississement local pourrait être en cause [2], mais les résultats numériques de Guillou et Makhouloufi [6] semblent indiquer le contraire. Enfin, Drappier et al. [7] ont récemment évoqué le phénomène de glissement à

la paroi comme origine possible. La quantification de la vitesse de glissement a été faite pour différents systèmes (CTAB, CTAC, CTCL...) sur la base d'essais rhéologiques complémentaires avec deux géométries de cylindres coaxiaux présentant des entrefers étroits.

Dans cette contribution, nous nous intéressons à ce phénomène de glissement à la paroi comme hypothèse du phénomène de réduction de la traînée. Le choix se porte sur une solution aqueuse de tensioactifs très faiblement concentrée (75 ppm) de manière à ce que le comportement rhéologique soit peu différent de celui du solvant pour être en situation d'écoulement où seuls les effets visqueux prédominent. Ainsi une solution équimolaire de cetyltriméthyl ammonium chlorure (CTAC) et de sodium salicylate (NaSal) a été étudiée à 20 °C. La viscosité de cette solution est de l'ordre de 1 mPa.s et reste constante sur la gamme de mesure 1 à 500 s⁻¹. Sa capacité à réduire la traînée a été montrée pour des concentrations supérieures à 25 ppm [8,9]. Nous explorons le phénomène de glissement à l'aide d'une cellule de Couette à large entrefer dans laquelle des mesures de champs de vitesse sont réalisées par vélocimétrie par image de particules (PIV). L'avantage principal de cette configuration d'écoulement est qu'elle permet une observation précise du champ d'écoulement dans tout l'entrefer et en particulier au voisinage des parois où le profil de vitesse est beaucoup plus pentu pour des écoulements avec des fluides réducteur de traînée [8,10].

2. Matériels et techniques expérimentales

La solution réductrice de traînée retenue pour cette étude est une solution de CTAC/NaSal dosée à 75 ppm [9]. Le dispositif utilisé dans ce travail est une cellule de cisaillement équipée d'une géométrie à cylindres coaxiaux [11,12]. Le cylindre intérieur à extrémité conique (rayon $R_1 = 10,5$ mm, hauteur cylindrique 60,2 mm, hauteur conique 11,9 mm) est en aluminium et est animé du mouvement de rotation. Celui-ci est monté verticalement sur un rhéomètre à contrainte imposée (Rhéoscope 1, Thermofisher). En écoulement, la pointe du cône se situe à 5 mm du fond du cylindre extérieur et la surface libre dépasse très légèrement l'extrémité supérieure du cylindre intérieur. Le couple délivré par le rhéomètre est asservi de manière à respecter les différentes consignes de vitesse de rotation ω (vitesse maximale : 1200 tr/min). Le cylindre extérieur fixe (rayon $R_2 = 33$ mm) est alésé dans un parallélépipède de PMMA de section carré 80 × 80 mm. Cette configuration permet d'illuminer le plan de visualisation au moyen d'une nappe laser (longueur d'onde 532 nm) horizontale frappant perpendiculairement une des faces plane du parallélépipède. La nappe coupe le cylindre intérieur à mi-hauteur sur la partie cylindrique. Les visualisations se font selon la direction de l'axe de révolution du système au moyen d'une caméra CCD double trame image intense (1376 × 1024 pixels) munie d'un objectif (Micro Nikkor, Nikon) de focale 105 mm et d'un miroir à 45° situé en dessous de la cellule. Le miroir est intégré dans une embase qui se fixe sur le rhéomètre, et qui comporte les éléments de réglages pour garantir la coaxialité des cylindres. Le fond plat de la cellule de Couette permet d'obtenir des images sans déformation optique. L'ensemencement du fluide est réalisé avec des particules sphériques de mélamine ($d = 2,81$ µm) teintées dans la masse avec un fluorophore (rhodamine 6B). L'acquisition des images à partir du signal de fluorescence induite (utilisation d'un filtre passe haut 540 nm) permet alors de s'affranchir des problèmes de réflexion lumineuse au niveau des parois.

La méthode de corrélation croisée adaptative (logiciel DAVIS, LaVision) a été utilisée pour traiter les paires d'images. La taille finale de la fenêtre d'interrogation a été fixée à 16 × 16 pixels avec 50% de recouvrement. Les champs instantanés de vitesses obtenus possèdent 172 × 128 vecteurs exprimés en coordonnées cartésiennes et répartis sur un maillage cartésien régulier. L'utilisation des coordonnées du centre de rotation dans le plan de visualisation et des valeurs des rayons des cylindres permet d'interpoler les champs de vitesse tangentielle U_θ et radiale U_r sur un nouveau maillage polaire en considérant seulement les nœuds du maillage polaire encadrés par quatre nœuds du maillage cartésien. On impose également les vitesses théoriques dans les régions solides (nulle pour le stator, vitesse d'entraînement pour le rotor). Le calcul des moyennes s'effectue en moyennant angulairement et temporellement les composantes du champ de vitesses. Pour le traitement statistique des résultats, nous travaillons avec des séries de 400 paires d'images. Ce nombre est suffisant pour obtenir une convergence des valeurs moyennes et des fluctuations de vitesse avec un indice de confiance de 95% [13].

Le système a été validé avec de l'eau pour un écoulement en régime laminaire obtenu avec une très faible vitesse de rotation (1 tr/min). Le profil moyen de la vitesse tangentielle (résultats non présentés ici) est parfaitement décrit par la solution théorique connue pour un fluide newtonien laminaire : $U_\theta(r) = \omega/R_2(R_1R_2)^2/(R_2^2 - R_1^2)[R_2/r - r/R_1]$. L'écart quadratique relatif constaté au sein de tout l'entrefer pour un écoulement à 2 tr/min autant pour l'eau que pour une solution de surfactant est de l'ordre de 5% en proche paroi et de 0,2 à 1% ailleurs.

Les expériences ont été conduites avec des vitesses de rotation imposées, allant de 170 à 700 tr/min, qui sont bien supérieures à celle conduisant à l'apparition des premières instabilités de Taylor ($\omega \approx 3$ tr/min). La mesure du couple résultant a été utilisée pour vérifier que la puissance dissipée au cours de l'écoulement dépendait du nombre de Reynolds et diminuait avec celui-ci [14]. Cette diminution est analogue à celle du coefficient de friction dans le cas des écoulements en conduite, et indique une diminution de la couche limite visqueuse [14]. En conduite, le taux de réduction de la traînée est classiquement donné à partir des mesures de perte de pression. Pour cette solution de tensioactif et pour un même niveau de confinement (22,5 mm), des taux de réduction allant jusqu'à 75% ont été observés. Cela dit, il faut bien garder à l'esprit que cette configuration d'écoulement est différente de celle de cette étude.

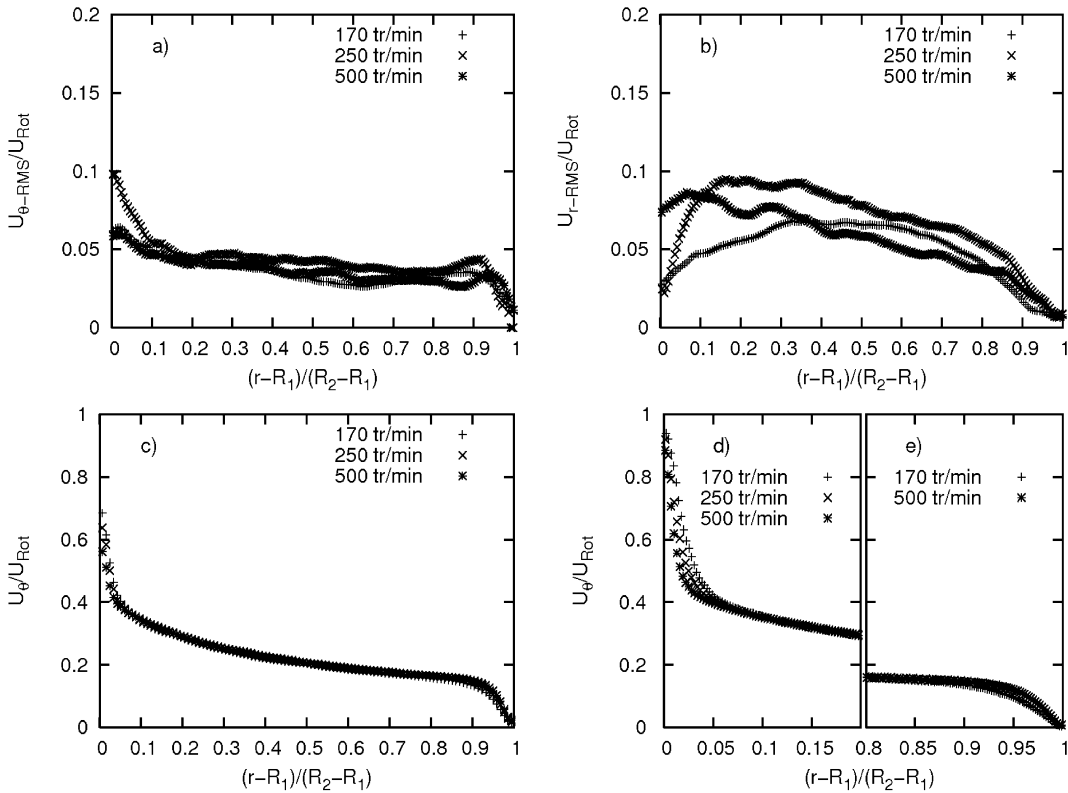


Fig. 1. Profils radiaux moyens normés par U_{Rot} pour de l'eau ($T = 20^\circ\text{C}$) pour différentes vitesses de rotation du rotor (U_{Rot}) : a) intensité tangentielle de la turbulence ($U_{\theta-RMS}$); b) intensité radiale de la turbulence (U_{r-RMS}); c) vitesse tangentielle moyenne (U_θ); vitesse tangentielle moyenne (U_θ) après affinage des mesures près du rotor (d) et près du stator (e).

Fig. 1. Mean radial profiles non-dimensionalized by U_{Rot} for water ($T = 20^\circ\text{C}$) with several rotor's velocities (U_{Rot}): a) tangential intensity of the turbulence ($U_{\theta-RMS}$); b) radial intensity of the turbulence (U_{r-RMS}); c) mean tangential velocity (U_θ); mean tangential velocity (U_θ) with more accurate measurement near the inner cylinder (d) and near the outer cylinder (e).

3. Résultats et discussions

Les Figs. 1 et 2 présentent respectivement les résultats en termes de moyennes RMS des fluctuations de vitesse radiale ($U_{r-RMS} = \sqrt{\sum(u'_r)^2}$) et tangentielle ($U_{\theta-RMS} = \sqrt{\sum(u'_\theta)^2}$), et de vitesse tangentielle moyenne (U_θ) adimensionnées par la vitesse du rotor (U_{Rot}). Elles concernent le cas des écoulements réalisés avec de l'eau et une solution aqueuse de CTAC/NaSal dosée à 75 ppm pour des vitesses de rotation allant de 170 à 700 tr/min.

Les Figs. 1a et 1b attestent, dans le cas de l'eau pure, que le régime est turbulent pleinement développé. Les moyennes RMS des fluctuations atteignent 10% de la vitesse du rotor. Les moyennes RMS des fluctuations de vitesses radiales dépassent les moyennes RMS de fluctuations de vitesses tangentielles (notamment au centre de l'entrefer).

Les Figs. 2a et 2b montrent, dans le cas de la solution aqueuse de CTAC, que le régime d'écoulement est turbulent réducteur de traînée. En effet, les fluctuations de vitesse tangentielle restent sensiblement du même ordre de grandeur que celles obtenues pour l'eau, montrant ainsi que le régime est turbulent, mais les moyennes de fluctuations de vitesse radiale sont par contre nettement réduites en comparaison à celles obtenues avec de l'eau. Ceci montre que l'on a affaire à un régime de réduction de la traînée comme le suggèrent Gyr et Bewersdorff [2].

Dans le cas de l'eau (Fig. 1c), les profils de vitesse moyenne tangentielle adimensionnée par la vitesse du rotor (U_θ/U_{Rot}) présentent trois grandes zones stables selon l'intensité du gradient de vitesse : une zone de très fort gradient près du rotor ; une zone à gradient assez faible au milieu de l'entrefer ($0,1 < [r - R_1]/[R_2 - R_1] < 0,9$) autour de $U_\theta/U_{Rot} \cong 0,25$; et une zone à gradient moyen à fort près du stator. Les profils pour les différentes vitesses du rotor se superposent parfaitement dans la partie centrale de l'entrefer, indépendamment de la vitesse de rotation. De faibles différences apparaissent dans les zones de forts gradients.

Dans le cas de la solution réductrice de traînée (Fig. 2c), les profils de vitesse moyenne tangentielle conduisent comme pour le cas de l'eau à trois zones d'écoulement mais de formes différentes : une zone de très fort gradient près du rotor ; une zone à gradient de vitesses presque nul au milieu de l'entrefer ($0,05 < [r - R_1]/[R_2 - R_1] < 0,95$) autour de $U_\theta/U_{Rot} \cong 0,1$; et une zone à gradient moyen à fort près du stator. Contrairement au cas de l'eau, les courbes pour les différentes vitesses de rotation ne sont pas superposées. De 170 et 250 tr/min, les profils évoluent pour finalement se stabiliser pour 500 et

700 tr/min. Sur cette figure, et pour toutes les fréquences de rotation du rotor, la valeur maximale de la vitesse tangentielle adimensionnée est de l'ordre de 0,4 au rotor au lieu de 1. Ce décalage très important, et non assimilable dans un premier temps à une erreur de mesure, pourrait être interprété comme un effet de glissement à la paroi (au rotor). Le même commentaire peut également être fait pour la paroi fixe où l'on observe dans une moindre mesure le même phénomène de décalage.

Un léger décalage entre les valeurs de vitesses tangentielles mesurées au voisinage des parois et celles théoriquement imposées est également observé dans le cas de l'eau (Fig. 1c). En effet, la vitesse tangentielle à la paroi mobile est de l'ordre de 0,8 (avec prolongement) au lieu de 1. Dans le cas de l'eau, il n'y a pas de phénomène de glissement à la paroi. Cet écart s'explique par l'existence de forts gradients de vitesses et par la difficulté à capter avec précision ce gradient pariétal avec la technique de mesure. Dans le cas de la solution de tensio-actifs, le gradient pariétal est plus important, et donc le biais existant dans le cas de l'eau peut être présent de manière plus accentuée.

Des mesures complémentaires localisées au niveau du rotor ($0 < [r - R_1]/[R_2 - R_1] < 0,2$) puis au niveau du stator ($0,8 < [r - R_1]/[R_2 - R_1] < 0,1$), par modification du rapport d'agrandissement de l'objectif, font apparaître une réduction très nette de cet écart dans le cas de l'eau (Figs. 1d et 1e). On retrouve bien des valeurs nulles au niveau de la paroi fixe, et le prolongement du profil moyen de U_θ/U_{Rot} à la paroi du rotor tend vers 1, montrant bien que l'écart observé précédemment avait pour origine la taille réelle (en mm) de la fenêtre d'interrogation utilisée. Cette dernière conditionne à la fois l'amplitude des déplacements particuliers pour chaque paire d'images, et la valeur de vitesse statistiquement la plus probable qui est d'autant plus moyennée que le gradient de vitesse est important au sein de la fenêtre. Les mesures avec la solution de tensio-actifs ont été refaites avec le même système (Figs. 2d et 2e) dans les mêmes zones. On retrouve de nouveau des vitesses nulles au niveau du stator et, a priori, U_θ/U_{Rot} est voisin de 0,9 près du rotor. Cependant, le gradient dans cette dernière zone est très fort, et le prolongement au rotor, quoique délicat, semble bien indiquer une valeur proche de 1 au rotor. Il ressort donc de ces dernières mesures, qu'en termes de vitesse moyenne et pour la solution de tensio-actifs utilisée, l'effet du glissement à la paroi ne soit pas un phénomène aussi important dans le mécanisme très complexe de la réduction de la traînée.

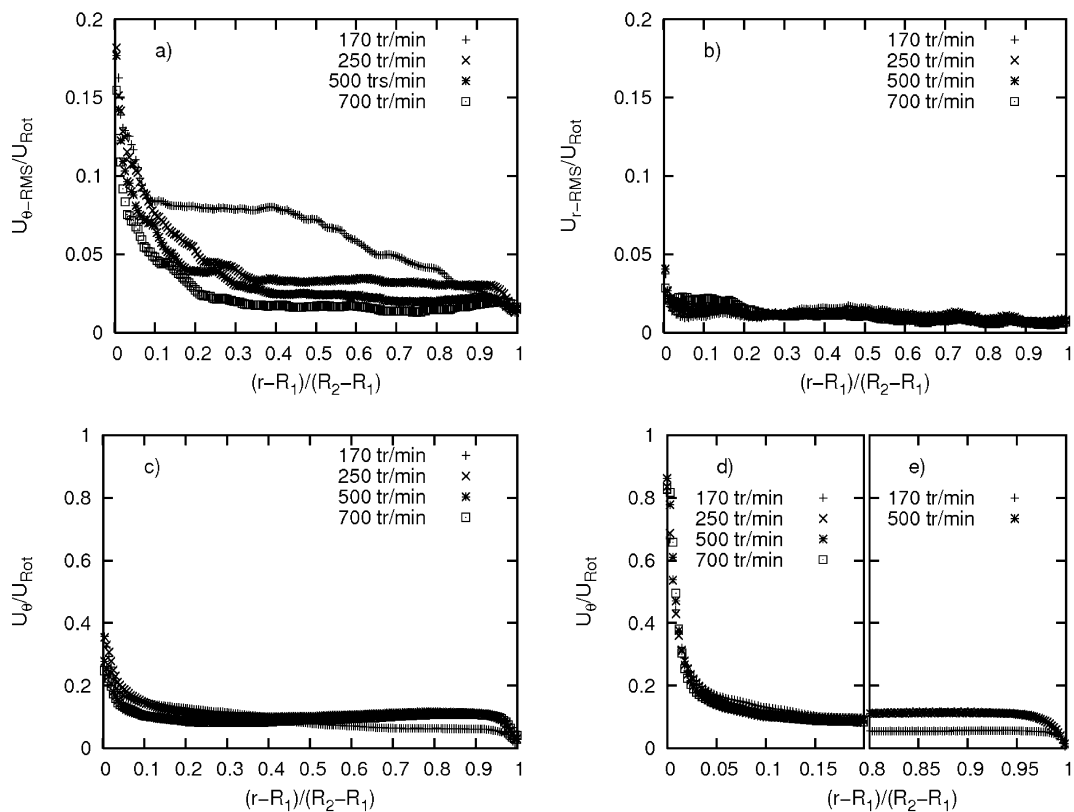


Fig. 2. Profils radiaux moyens normalisés par U_{Rot} pour une solution aqueuse de CTAC/NaSal dosée à 75 ppm ($T = 20^\circ\text{C}$) pour différentes vitesses de rotation du rotor (U_{Rot}): a) intensité tangentielle de la turbulence ($U_{\theta-RMS}$); b) intensité radiale de la turbulence (U_{r-RMS}); c) vitesse tangentielle moyenne (U_θ); vitesse tangentielle moyenne (U_θ) après affinage des mesures près du rotor (d) et près du stator (e).

Fig. 2. Mean radial profiles non-dimensionalized by U_{Rot} for an aqueous solution of CTAC/NaSal dosed at 75 ppm ($T = 20^\circ\text{C}$) with several rotor's velocities (U_{Rot}): a) tangential intensity of the turbulence ($U_{\theta-RMS}$); b) radial intensity of the turbulence (U_{r-RMS}); c) mean tangential velocity (U_θ); mean tangential velocity (U_θ) with more accurate measurement near the inner cylinder (d) and near the outer cylinder (e).

4. Conclusion

Des mesures PIV en cellule de Couette à large entrefer ont été conduites afin d'explorer l'hypothèse de glissement à la paroi dans le cas d'une solution de CTAC/NaSal dosée à 75 ppm à 20 °C. Cette solution présente un fort pouvoir réducteur de traînée dans le cas des écoulements en conduite. Bien que les conditions dans une conduite et dans une cellule de Couette soient différentes, cette géométrie permet de mieux faire apparaître ce genre de phénomène. La largeur de l'entrefer permet l'utilisation de la vélocimétrie par image de particule et l'obtention d'un régime d'écoulement turbulent.

Bien que les premiers résultats en terme de profils moyens de vitesse semblaient impliquer un effet de glissement, un raffinement de la technique en proche paroi a permis d'écarter cette hypothèse dans le cas de la solution aqueuse de CTAC/NaSal dosée à 75 ppm. Les écoulements rapportés dans cette étude montrent que le phénomène de réduction de la traînée affecte les différentes échelles de la turbulence. Une description plus complète doit être faite en effectuant d'une part des visualisations dans le plan orthogonal à la direction principale de l'écoulement, et en analysant d'autre part les champs de vitesse au moyen d'une décomposition en modes propres (POD).

Références

- [1] B.A. Toms, Some observation on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds number, in: Proceedings of the First International Congress of Rheology, vol. 2, North Holland, Amsterdam, 1949, pp. 135–141.
- [2] A. Gyr, H.W. Bewersdorff, Drag Reduction of Turbulent Flows by Additives, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1995.
- [3] J.L. Lumley, Drag reduction by additives, Ann. Rev. Fluid Mech. 1 (1969) 367–384.
- [4] M. Tabor, P.G. De Gennes, A cascade theory of drag reduction, Europhys. Lett. 2 (1986) 519–524.
- [5] B. Lu, X. Li, J.L. Zakin, Y. Talmon, A non-viscoelastic drag reducing cationic surfactant system, J. Non-Newtonian Fluid Mech. 71 (1997) 59–72.
- [6] S. Guillou, R. Makhloufi, Effect of a shear-thickening rheological behaviour on the friction coefficient in a plane channel flow: a study by direct numerical simulation, J. Non-Newtonian Fluid Mech. 144 (2007) 73–86.
- [7] J. Drappier, T. Divoux, Y. Amarouchene, F. Bertrand, S. Rodts, O. Cadot, J. Meunier, D. Bonn, Turbulent drag reduction by surfactants, Europhys. Lett. 74 (2) (2006) 362–368.
- [8] F. Hadri, M. Hartngael, A. Besq, S. Guillou, R. Makhloufi, Experimental study on drag reduction by surfactant additives in a turbulent pipe flow, in: Conference on Hydraulic Engineering, Dresden, 2006, pp. 337–344.
- [9] F. Hadri, Contribution à l'étude de la réduction de la traînée en écoulement turbulent d'une solution de CTAC, thèse de doctorat, université de Caen Basse-Normandie, 2008, p. 170.
- [10] J.L. Zakin, B. Lu, H.W. Bewersdorff, Surfactant drag reduction, Rev. Chem. Eng. 14 (1998) 255–320.
- [11] F. Hadri, A. Besq, S. Guillou, R. Makhloufi, Situation d'écoulement d'une solution de tensio-actifs réductrice de la traînée, in : 4ème Colloque International de Rhéologie, Oran, 2006, pp. 27–34.
- [12] A. Besq, A. Santa Cruz, R. Makhloufi, Mesures PIV pour l'étude de l'écoulement viscosimétrique de suspensions thixotropes à seuil, in : 41ème Colloque du Groupe Français de Rhéologie, Cherbourg, 2006, pp. 205–208.
- [13] F. Scarano, M.L. Riethmuler, Advances in iterative multigrid PIV image processing, Exp. Fluids 29 (Supplement) (2000) 51–60.
- [14] O. Cadot, D. Bonn, S. Douady, Turbulent drag reduction in a closed flow system: Boundary layer versus bulk effects, Phys. Fluids 10 (1998) 426–436.