

# Influence du diamètre sur la réduction de la traînée par l'ajout de tensioactifs en écoulement turbulent

F. HADRI, A. BESQ, S. GUILLOU, R. MAKHLOUFI

Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg (EA4253)

Site Universitaire, BP 78, 50130 Cherbourg-Octeville, France.

## Résumé :

*Certaines solutions d'additifs (polymères ou surfactants par exemple) ont le pouvoir de réduire le coefficient de frottement en écoulement turbulent comparé à l'écoulement du solvant pur (jusqu'à 80%). Nous étudions par voie expérimentale les effets d'une solution du CTAC à faibles concentrations sur l'écoulement. Plusieurs paramètres tels que la température, la concentration et l'ajout ou non de contre-ions ont été étudiés. L'influence du diamètre, peu étudiée dans la littérature, est l'objet de ce travail. Nous étudions les pertes de charges et les structures tourbillonnaires observées dans les champs de vitesses mesurées par PIV.*

## Abstract:

*Some additives in solutions (polymers or surfactants, for example) can reduce the friction coefficient in turbulent flow compared to the water flow (up to 80%). Several parameters such as temperature, concentration and the addition or not of contre-ions were largely studied, but this is not the case of the diameter: this is the subject of this study. The pressure drop and the vortex structures are studied with field measurements obtained by PIV.*

**Mots clefs : réduction de la traînée, additifs, turbulence, frottement.**

## 1 Introduction

La présence de très petites quantités d'additifs (polymères, tensio-actifs ou fibres) dans un fluide quelconque, consiste en une réduction significative du frottement à la paroi en régime turbulent. En effet, cette réduction de frottement à la paroi conduit à une réduction significative de la perte de charge en écoulement turbulent [1]. Cette réduction peut atteindre un taux de 80% en comparaison à de l'eau pure. Les solutions réductrices de la traînée sont principalement, les solutions de polymères (structure macromoléculaire) et des tensioactifs (structure micellaire). Les solutions de polymères sont développées pour être utilisées en milieux aqueux (par exemple pour les lances à incendie), mais ont été utilisées aussi dans d'autres applications comme dans le domaine pétrolier pour réduire les pertes de charge dans les pipelines. La réduction de traînée par l'ajout de tensioactifs est connue depuis les années 50 [2]. Ce type d'additif présente une résistance aux dégradations mécaniques comparé aux polymères, par conséquent, une durée de vie plus importante (régénération de chaînes de micelles de tensioactifs lors des cisaillements importants et passage par les singularités).

De nombreux travaux ont été consacrés à l'étude de ce phénomène [3, 4, 5]. Pourtant, il n'existe pas à l'heure actuelle de modèle universellement accepté pour expliquer ce mécanisme. En effet, certaines solutions présentent un rhéo-épaississement local (Shear-Induced State), d'autres ont un comportement rhéologique peu différent de celui obtenu pour de l'eau. Pour expliquer le comportement réducteur de la traînée de ces systèmes, quelques hypothèses sont avancées tels que les caractéristiques rhéo-fluidifiantes, rhéo-épaississantes ou viscoélastiques, et les effets de l'élongation. Cependant, des contre-exemples viennent souvent remettre en causes ces hypothèses. Pour Gyr et Bewersdorff [6], 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 [6], mais les résultats numériques de Guillou et Makhloufi [7] semblent indiquer le contraire. Enfin, Drappier et al. [8] ont récemment évoqué le

phénomène de glissement à la paroi comme origine possible. De plus, la réduction de la traînée est influencée par plusieurs paramètres tels que la concentration, la température et la géométrie [2, 9].

Dans cette contribution, nous nous intéressons à un des paramètres influençant considérablement la réduction de la traînée. En effet, d'après plusieurs auteurs [6, 2, 10] la géométrie à une influence significative sur les caractéristiques de l'écoulement comparé aux fluides newtoniens (eau). Ainsi une solution de CetyltriMethyl Ammonium Chloride (CTAC) mélangée à du sodium Salicylate (NaSal) a été étudiée à 20°C. La viscosité de cette solution est très proche de celle trouvée pour de l'eau (de l'ordre de 1 mPa.s). Sa capacité à réduire la traînée a été démontrée pour des concentrations de quelques dizaines de ppm [11, 9, 2]. Dans cette étude, nous explorons l'influence du diamètre sur la réduction de la traînée dans un dispositif expérimental de type boucle de recirculation. D'une part des capteurs de pression ont été utilisés pour quantifier la réduction de la traînée (coefficient de frottement). D'autre part, la vélocimétrie par images de particules (PIV) a été utilisée pour étudier l'effet du tensioactif sur les caractéristiques de la turbulence (organisation de l'écoulement).

## 2 Moyens et techniques expérimentales

Le tensioactif utilisé dans la présente étude est le *CetyltriMethyl Ammonium Chloride*, (C<sub>16</sub>H<sub>33</sub>N(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>Cl) dissous dans l'eau du robinet. Ce tensioactif appartient au groupe des tensioactifs cationiques peu affectés par les ions métalliques présents dans l'eau. Du Salicylate de sodium (NaSal) a été ajoutée comme contre-ions avec une concentration équivalente en poids [12]. Ce sel (NaSal) est ajouté afin de permettre une meilleure stabilisation de la solution et réduire les concentrations en tensioactifs utilisées. Dans cette étude, nous utilisons une solution de CTAC / NaSal dosée à 75 ppm. Les mesures de la viscosité avec un rhéomètre AR1000 (en géométrie Couette) et au rhéomètre capillaire donnent une viscosité proche de celle trouvée pour de l'eau (1 mPa.s dans le premier cas, et 1,17 mPa.s, dans le second), avec une variation de l'ordre de l'incertitude des appareils.

Les expériences ont été réalisées dans un circuit en boucle fermée horizontale (Figure 1). Le circuit se compose de deux longues sections linéaires. La première est un tube en acier inoxydable (304L) équipé d'un capteur de pression différentiel (DRUCK, PDCR 2111) relié à deux prises de pression distantes de 6 mètres. Pour ce travail, trois diamètres ont été étudiés (10, 17 et 22,5 mm). La partie visualisation est un tube en verre de 1,2 mètre de longueur. L'écoulement est généré par une pompe volumétrique (PCM, MR13110). La température est contrôlée par un échangeur thermique à contre-flux et mesurée par deux capteurs de température (ANALOG DEVICES, AD592CN). Toutes les données expérimentales (température, pression différentielle, débit) sont récupérées par un système d'acquisition et traitées par ordinateur.

Le coefficient de frottement est défini comme le rapport de la contrainte de cisaillement à la paroi et de l'énergie cinétique de l'écoulement (Eq. 1), où  $U$  représente la vitesse débitante et  $\rho$  est la masse volumique. La contrainte de cisaillement à la paroi ( $\tau_w$ ) est liée à la chute de pression mesurée le long du tuyau de longueur  $L$  et de diamètre  $D$  (Eq. 2).

$$f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (1)$$

$$\tau_w = \frac{\Delta P D}{4L} \quad (2)$$

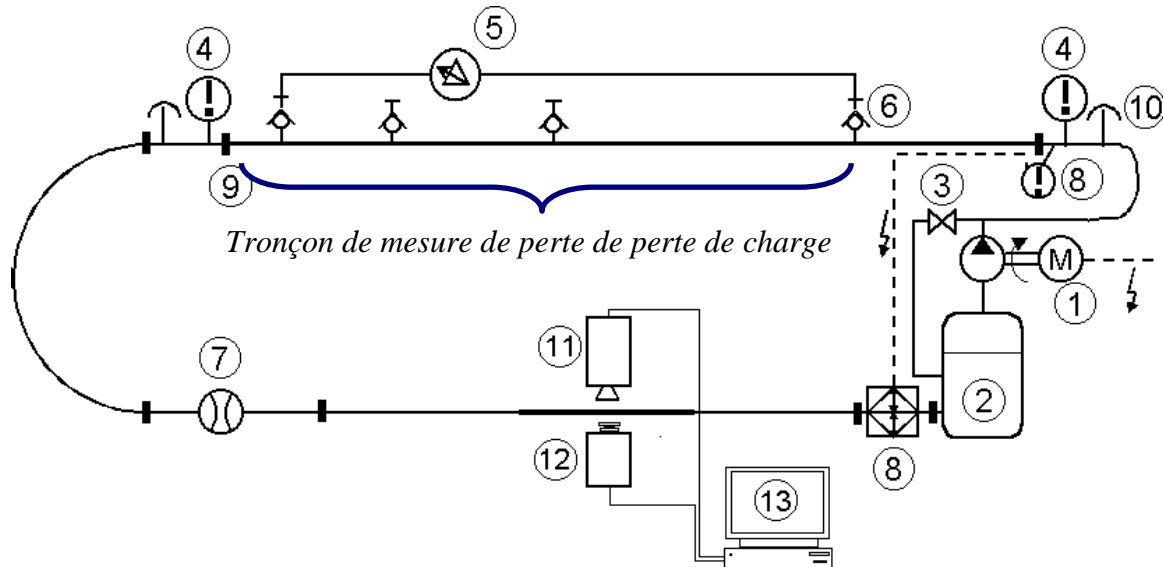
En écoulement, à débit identique la réduction de la traînée implique la réduction de la chute de pression. Si on considère une chute de pression identique, le débit augmente. Comme Zakin et al. [2], nous définissons le taux de réduction de la traînée pour un débit constant (Eq. 3), où  $f_s$  est le coefficient de frottement pour de l'eau et  $f_{DR}$  pour la solution réductrice de la traînée. Ainsi, le coefficient de frottement est généralement tracé en fonction du nombre de Reynolds basé sur la vitesse débitante, le diamètre de la conduite et la viscosité du solvant.

$$DR(\%) = \frac{f_s - f_{DR}}{f_s} \quad (3)$$

Pour effectuer les mesures PIV, la section d'essai du tube en verre a été enfermée dans une boîte rectangulaire transparente en verre remplie d'eau afin de réduire l'effet de courbure optique et d'améliorer la qualité des images PIV. Les mesures ont été effectuées à environ 70 centimètres de l'entrée du tube en verre afin d'avoir un écoulement stable lors des mesures. Le fluide estensemencé avec des particules en verre creuses de 15  $\mu$ m de diamètre. La source d'éclairage est un double laser pulsé Nd-Yag (50 mJ, Solo PIV New

Wave Research). La nappe laser est positionnée perpendiculairement à la caméra CCD d'une fréquence de 5 Hz (1024×1280 pixels). Les champs de vitesses sont obtenus par vélocimétrie par images de particules (logiciel Davis de La Vision). Ces champs de vitesses couvrent environ 13×16 mm du tube de mesure, ceci permet d'accéder aux résultats tous les dixièmes de millimètre. Les images PIV sont traitées à l'aide de corrélation croisée (FFT) sur des fenêtres de 64×64 pixels pour la première passe et 32×32 pixels pour la deuxième passe avec un recouvrement de 50%. Enfin, les champs de vitesses moyens sont calculés à partir de 1000 instants. Ces résultats sont moyennés en temps et en espace suivant la direction de l'écoulement.

Les résultats de mesures de pertes de pressions ont été effectués sans ensemencement contrairement aux mesures par PIV. Des mesures de pression avec une solution de surfactant ensemencée ont été réalisées pour observer l'impact des particules de verre creuses. Il apparaît que celles-ci n'ont pas d'impact sur la perte de charge et donc sur la réduction de la traînée. En revanche, on observe une tendance à une dégradation anticipée tout le pouvoir réducteur de la traînée [10].



1: Motopompe pilotée par un variateur de fréquence  
 2: Réservoir avec déversoir  
 3: By-pass  
 4: Capteurs de température  
 5: Capteur de pression différentielle  
 6: Prise de pression  
 7: Débitmètre électromagnétique

8: Echangeur de chaleur contre courant alimenté par un cryostat avec sonde de température externe  
 9: Raccords micro clamp  
 10: Purges  
 11: Laser  
 12: Caméra  
 13: Système d'acquisition

FIG. 1 : Schéma de la boucle d'essai expérimentale.

### 3 Résultats et discussion

Le coefficient de frottement en fonction du nombre de Reynolds pour des diamètres de 10, 17 et 22,5 mm à une température de 20°C est donné par la figure FIG. 2.a. Lorsque le nombre de Reynolds est inférieur à 10000, le coefficient de frottement suit une droite de pente linéaire parallèle à celle trouvée pour de l'eau en régime laminaire, puis l'asymptote de Virk ( $C_f = 0,58 Re^{-0,58}$ ) donnée généralement pour des solutions de polymères à des nombres de Reynolds supérieurs [13]. Cependant, l'asymptote de Chara ( $C_f = 0,32 Re^{-0,55}$ ) représentant les solutions de surfactants n'est pas atteinte [2]. Le décrochement du coefficient de frottement de cette asymptote se fait à des nombres de Reynolds différents dépendant du diamètre de la conduite, vers un nombre de Reynolds de 20000 pour un diamètre de 10 mm, 30000 pour 17 mm et plus de 40000 pour un diamètre de 22,5 mm. Bewersdorff et Ohlendorf [6] ont aussi remarqué une influence non négligeable du diamètre sur la réduction la traînée dans leurs travaux avec des concentrations bien supérieures à celles utilisées dans ce travail. Le taux de réduction de la traînée en fonction de la vitesse débitante est présenté sur la figure FIG. 2.b. Le maximum de la réduction de la traînée est d'environ 65 % pour un diamètre de 10 mm

avec une étendue d'application allant jusqu'à des nombres de Reynolds avoisinant les 20000. Ce taux de réduction dépasse légèrement les 70 % pour un diamètre de 17 mm à des nombres de Reynolds supérieurs à 30000. Pour un diamètre de 22,5 mm, la réduction de la traînée frôle les 80 % à un nombre de Reynolds de 45000.

En hydraulique, le débit et la vitesse d'écoulement sont des paramètres souvent utilisés durant l'étude d'un projet. La figure FIG. 3.a qui représente la réduction de la traînée en fonction du débit pompé, peut nous aider à choisir le diamètre du circuit hydraulique à utiliser. Pour de faibles débits, une réduction de traînée supérieure à 50 % peut être obtenue entre 3 et 8 l/min. Pour des débits compris entre 5 et 22 l/min environ, un diamètre de 17 mm nous donne des résultats satisfaisants avec des réductions de traînée supérieures à 65 %. Si le système demande un débit plus conséquent, un diamètre de 22,5 nous donne une réduction de traînée supérieure à 65 % et peut atteindre les 80 % entre un débit de 15 et 45 l/min. Les vitesses correspondant aux taux de réduction de la traînée à différents diamètres sont présentées sur la figure FIG. 3.b. Le maximum de réduction de la perte de charge est compris entre une vitesse de 0,5 et 2 m/s pour les trois diamètres avec une légère augmentation de la vitesse maximale limite vers des valeurs plus importantes avec l'accroissement du diamètre. Ces résultats, nous donnent l'impression que le nombre de Reynolds n'est pas suffisant pour prendre en compte l'effet de la géométrie de la conduite.

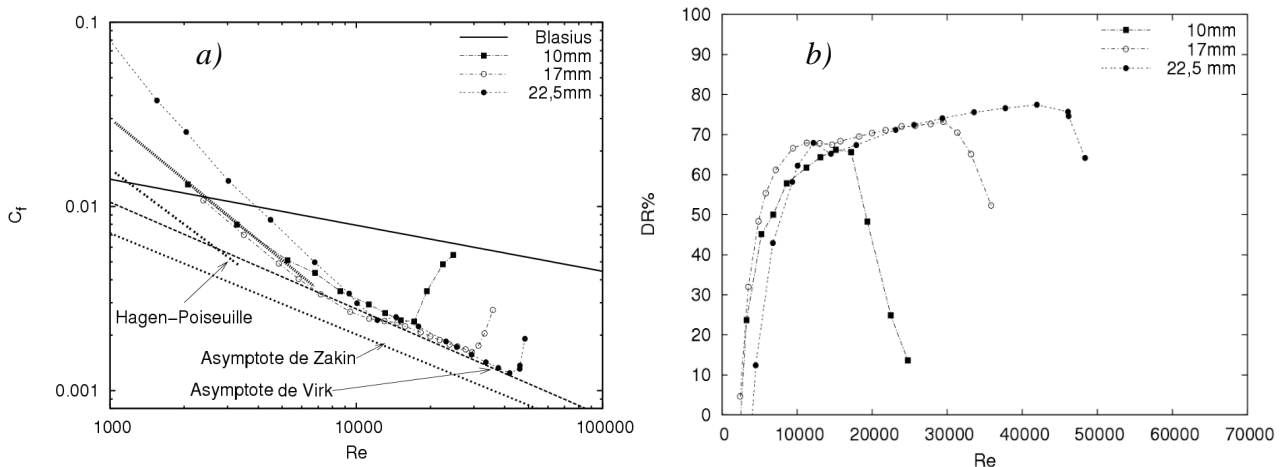


FIG. 2 : a) Evolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de Reynolds ; b) Evolution de la réduction de traînée en fonction du nombre de Reynolds.

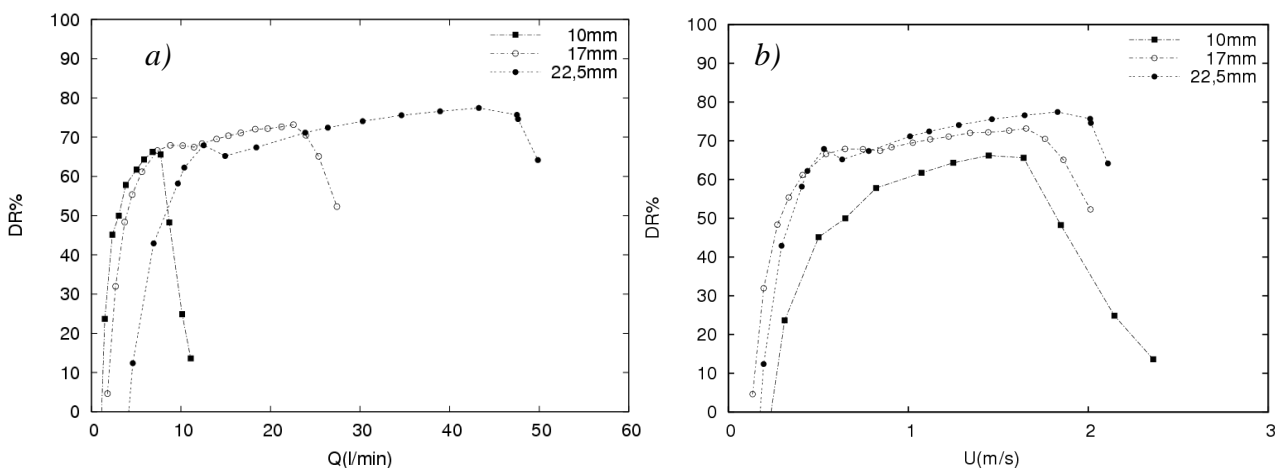


FIG. 3 : Evolution de la réduction de traînée en fonction du débit ; b) Evolution de la réduction de traînée en fonction de la vitesse débitante ( $C=75$  ppm et  $T^{\circ}=20^{\circ}C$ ).

Sur la figure FIG. 4 sont présentés les profils de vitesses moyennes adimensionnées en coordonnées de paroi pour différents nombres de Reynolds à une concentration de 75 ppm et une température de  $20^{\circ}C$ . Pour de l'eau, le profil est donné par la loi de parois. Concernant les solutions de surfactant, les profils suivent l'asymptote de Virk dès la première valeur jusqu'à une valeur de  $y^+ \approx 100$  ( $10 < y^+ < 100$ ) pour finir en droite horizontale pour des valeurs supérieures de  $y^+$  pour un diamètre de 22,5 mm.

Pour un diamètre de 17 mm, les profils de vitesses moyennes adimensionnées en coordonnées de paroi affichent des valeurs supérieures à l'asymptote de Virk et ne finissent par la rejoindre qu'à des valeurs de  $y^+ > 30$  et enfin changer de comportement à des valeurs de  $y^+ > 150$ . Ce comportement est plus proche d'un comportement trouvé pour des solutions de polymères [2].

Les tensions de Reynolds ( $R_{xy} = -\overline{u'v'}$ ) adimensionnées par la vitesse de frottement ( $u_\tau^2$ ) données pour de l'eau suivent une droite de pente (-1). Pour les solutions de surfactants, ces tensions présentent une différence non négligeable entre un diamètre de 17 et de 22,5 mm (FIG. 5). Aux nombres de Reynolds inférieurs à 24500 (entre  $Re \approx 5600$  et  $Re \approx 24500$ ), les résultats fluctuent autour d'une valeur nulle pour les deux diamètres 17 et 22,5 mm. A un nombre de Reynolds de 32000, les tensions de Reynolds restent fluctuantes autour d'une valeur proche de zéro à un diamètre de 22,5 mm et augmentent pour  $D=17$  mm pour se rapprocher des résultats obtenus pour un fluide newtonien en régime turbulent. Ce comportement peut s'expliquer par le commencement tardif de la perte de la réduction de la traînée dans le cas des grands diamètres, conséquence d'un cisaillement plus important dans des diamètres plus petits à un même nombre de Reynolds.

Les résultats obtenus montrent que contrairement aux fluides newtoniens, il n'est pas possible de négliger l'influence de la géométrie de la conduite dans l'étude de la réduction de la traînée en utilisant le nombre de Reynolds. Ceci concorde avec des études faites dans ce sens par Bewersdorff and Ohlendorf [14] et Indartono et al [15] en utilisant d'autres types de surfactants avec des conditions expérimentales différentes.

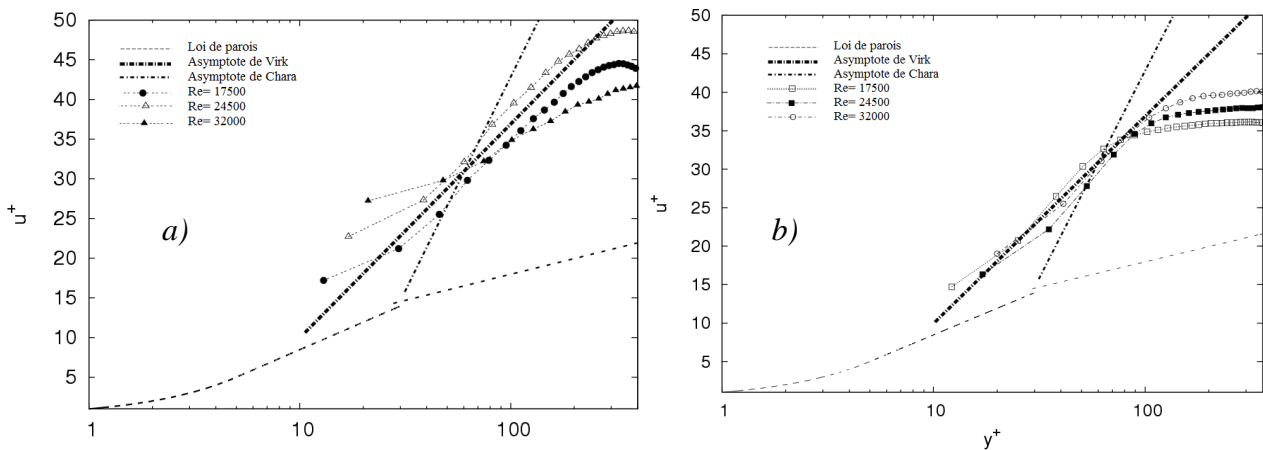


FIG. 4 : Profils moyens de vitesses en coordonnées de paroi à différents nombres de Reynolds : a)  $D=17$  mm ; b)  $D=22,5$  mm, ( $T=20^\circ\text{C}$  et  $C=75$  ppm).

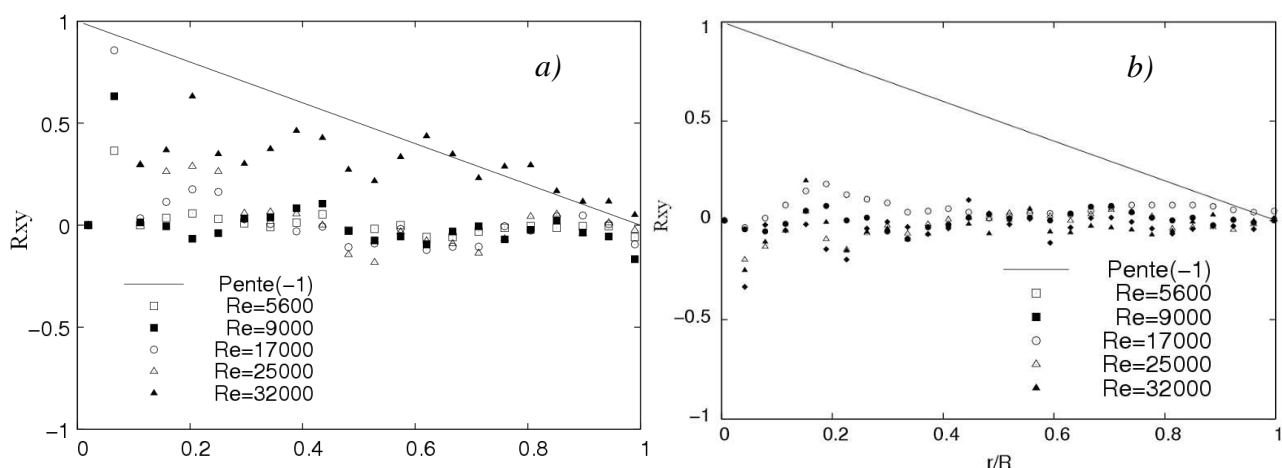


FIG. 5 : Tensions de Reynolds d'une solution de tensio-actifs dosée à 75 ppm à une température de  $20^\circ\text{C}$ , a)  $D=17$  mm et b)  $D=22,5$  mm.

## 4 Conclusion

L'étude de l'influence du diamètre sur la réduction de la traînée avec une solution de surfactant (CTAC) réalisée dans ce travail montre que l'influence du diamètre est non négligeable. En effet, la réduction de la traînée augmente avec le diamètre ainsi que le nombre de Reynolds critique correspondant au début de la chute de la réduction de perte de charge. Il est aussi notable que l'étendue de la réduction de traînée augmente sensiblement avec le diamètre, d'où la nécessité d'utiliser des gros diamètres pour les hauts débits afin d'avoir une réduction de traînée significative. Il est aussi intéressant d'insister sur le fait que la réduction de la traînée se manifeste dans des gammes de vitesses très proches indépendamment du diamètre. Il est donc possible d'approfondir ce point avec une étude étendue sur un nombre plus important de diamètres.

## References

- [1] Toms B.A., 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, North Holland, Amsterdam, 2 (1949) 135-141.
- [2] J. L. Zakin, B. Lu, H. W. Bewersdorff, Surfactant Drag Reduction, Reviews in Chemical Engineering, 14 (1998) 255-320.
- [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 reduction cationic surfactant system, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 71 (1997) 59-72.
- [6] A. Gyr, H.W. Bewersdorff, Drag Reduction of Turbulent Flows by Additives, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1995.
- [7] 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 International, Journal for Non Newtonian Fluid Mechanics, 144 (2007) 73-86.
- [8] 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.
- [9] F. Hadri, A. Besq, S. Guillou et R. Makhloufi, Temperature and concentration influence on Drag Reduction of CTAC/NaSal aqueous solution in Turbulent Pipe Flow, Journal for Non-Newtonian Fluid Mechanics, 166 (2011), 326-331.
- [10] 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) 170.
- [11] F. Hadri, M. Hartngael, A. Besq, S. Guillou, R. Makhloufi, Experimental study on drag reduction by surfactant additives in a turbulent pipe flow, Conference on Hydraulic Engineering, Dresden (2006) 337-344.
- [12] F.C. Li, Y. Kawaguchi, T. Segawa and K. Hishida, Reynolds number dependence of turbulence structures in a drag-reduction surfactant solution channel flow investigated by particle image velocimetry, Physics of Fluids, 17 (2005) 75-104.
- [13] P.S. Virk, Drag reduction fundamentals, AIChE J, 21, 1975, pp. 625-656.
- [14] H.W. Bewersdorff, D. Ohlendorf, The behavior of drag-reduction cationic surfactant solutions, Colloid Polym. Sci. 266 (1988) 941-953.
- [15] Y.S. Indartono, H. Usui, H. Suzuki, Y. Comoda, Temperature and diameter effect on hydrodynamic characteristic of surfactant drag reduction flows, Korea-Aust. Rheol. J. 17 (4) (2005) 157-164.