



## Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : <http://oatao.univ-toulouse.fr/>  
Eprints ID : 9556

**To cite this version** : Anne-Archard, Dominique and Boisson, Henri-Claude and Marouche, Mohamed. *Etude expérimentale de l'hydrodynamique d'une cuve agitée en fluide viscoplastique*. (2007) In: 18ème Congrès Français de Mécanique CFM 2007, 27-31 Aou 2007, Grenoble, France.

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: [staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr](mailto:staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr)

# Etude expérimentale d'une cuve agitée en fluide viscoplastique

Dominique Anne-Archard, Henri-Claude Boisson, Mohamed Marouche

Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse  
UMR CNRS/INP-ENSEEIH/UPS 5502  
Allée du Professeur Camille Soula, 31400 Toulouse, France  
Dominique.Anne-Archard@imft.fr

## Résumé :

*De nombreux procédés industriels font appel à des opérations de mélangeage en fluide non newtonien et leur efficacité est conditionnée par l'hydrodynamique se développant dans le système d'agitation utilisé. Ce travail propose une étude expérimentale par vélocimétrie par image de particule (PIV) d'un système cuve cylindrique-agitateur ancre dans le cas de fluides viscoplastiques et en régime laminaire. L'hydrodynamique est explorée dans un plan médian horizontal de la cuve. L'étude a été réalisée en fluide newtonien (solution de glucose) et en fluide viscoplastique avec des solutions de Carbopol. L'effet de glissement observé avec une paroi lisse est annulé par l'emploi d'un revêtement rugueux sur la cuve. Les mesures de vitesses sont présentées et des différences très significatives sont mises en évidence entre fluide newtonien et fluide viscoplastique. On compare ces résultats avec des résultats numériques obtenus en fluide de Herschel-Bulkley sur la même géométrie.*

## Abstract :

*Mixing of non Newtonian fluids is a common situation in industrial processes whose efficiency is conditioned by stirring tank hydrodynamics. An experimental study using Particle Image Velocimetry (PIV) is made in a cylindrical vessel equipped with an anchor agitator operating in the laminar regime. The velocity field is measured in the median plane of the vessel for a Newtonian glucose solution and for a viscoplastic Carbopol solution for the same rotation speeds of the agitator. Wall slip occurs with the non Newtonian fluid for a smooth wall. This effect is cancelled by use of added roughness at the vessel wall. Measured values are significantly different from the Newtonian case. Comparison is made between the present results and those of a numerical study performed for Herschel-Bulkley fluids.*

## Mots-clefs :

**fluide viscoplastique ; hydrodynamique ; système d'agitation**

## 1 Introduction

Les opérations de mélange sont fréquemment utilisées dans les procédés et elles font tout aussi fréquemment intervenir des fluides à comportement non newtonien. On les rencontre dans des domaines aussi variés que l'agro-alimentaire, les peintures, les cosmétiques, ou, de façon générale, tout procédé mettant en œuvre des suspensions, des émulsions, des polymères.... S'il existe de nombreuses études de l'hydrodynamique des mélanges en réacteur en fluide newtonien généralisé, il existe par contre peu de résultats en fluide viscoplastique. On citera en particulier les travaux de Hirata *et al.* (1996) sur l'existence d'une 'caverne' à l'extérieur de laquelle le fluide n'est pas mis en mouvement par l'agitateur, et de Einz-Mozaffari *et al.* (2005) sur la circulation à l'intérieur d'un système agité contenant de la pulpe de papier. Bertrand *et al.* (1996) ont réalisé une approche numérique d'un système d'agitation en fluide de Bingham qui leur permet de mettre en évidence la forte influence du caractère viscoplastique sur

l'hydrodynamique et sur la puissance consommée. Curran *et al.* (2000) ont, quant à eux, étudié expérimentalement l'hydrodynamique et les temps de circulation dans un réacteur à ruban hélicoïdal. Anne-Archard *et al.* (2006) ont proposé sur la base d'une étude numérique (Marouche, 2002), une discussion de l'application du critère de Metzner et Otto à de tels écoulements. La présente étude a pour but de réaliser une exploration expérimentale d'un système d'agitation en fluide viscoplastique et en régime laminaire. Le système choisi est constitué d'une cuve cylindrique et d'un agitateur ancre, il est utilisé pour les fluides très visqueux.

## 2 Matériels et méthodes

### 2.1 Dispositif expérimental

L'étude a été réalisée dans un premier temps avec une solution de glucose ( $\eta_n = 0.2 \text{ Pa.s}$ ) afin d'avoir une référence newtonienne puis avec une solution de Carbopol à 0,2% ayant un comportement viscoplastique. Celui-ci a été caractérisé à l'aide d'un rhéomètre Bohlin C-VOR équipé de plans striés et l'ajustement d'une loi de type Herschel-Bulkley ( $\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n$ ) donne un seuil  $\tau_0$  de 70 Pa, une consistance  $K$  de 21  $\text{Pa.s}^n$  et un indice de comportement  $n$  égal à 0,36.

Le système d'agitation utilisé est constitué d'une cuve cylindrique en plexiglas et d'un agitateur ancre. Il est présenté, avec ses dimensions, sur la figure 1. Ce type d'agitateur est employé pour les fluides très visqueux. Il présente en outre l'avantage de générer un écoulement majoritairement bidimensionnel. Ceci a été vérifié, aussi bien en fluide newtonien qu'en fluide viscoplastique lors d'une étude par simulation numérique (Marouche, 2002). L'exploration, par une technique de vélocimétrie par images de particules (PIV) du champ de vitesse dans un plan médian horizontal permet donc une caractérisation assez complète de l'hydrodynamique.

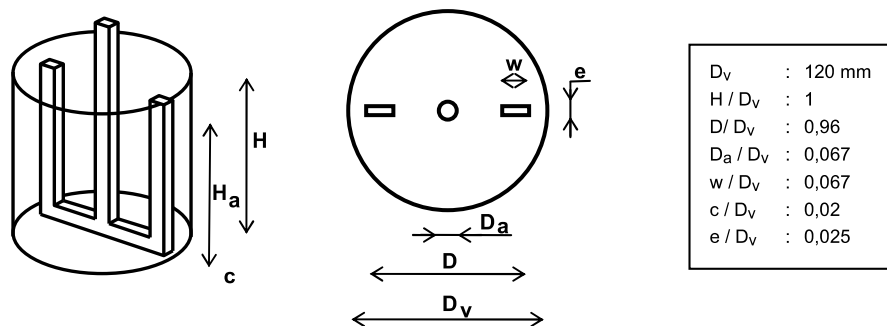


FIG. 1 – Le système d'agitation.

L'ensemble du dispositif expérimental est représenté sur la figure 2. Le système d'agitation est maintenu dans un bain thermostaté à 20°C. Le dispositif de PIV utilisé est constitué d'une source laser Nd-YAG double cavité (Quantel, Twin Ultra 30, 30mJ) et d'une caméra CCD (Sensicam QE, 1280x1024 pixels). Le laser et la caméra sont pilotés par un boîtier de synchronisation conçu au laboratoire. Ce boîtier reçoit un signal de déclenchement du codeur angulaire qui est monté sur l'arbre d'agitation. Ceci permet de réaliser des acquisitions successives (une par tour) pour une position donnée de l'agitateur sur le champ photo. Le champ de vitesse est ensuite obtenu en moyennant les champs instantanés mesurés.

Les solutions sont ensemencées avec des billes de verres creuses argentées de diamètre 15 $\mu\text{m}$  et les doublés de photos sont traités avec un logiciel développé au laboratoire : PIVIS

(Maurel, 2000). Les champs de vitesse présentés sont des champs moyens obtenus sur 90 acquisitions.

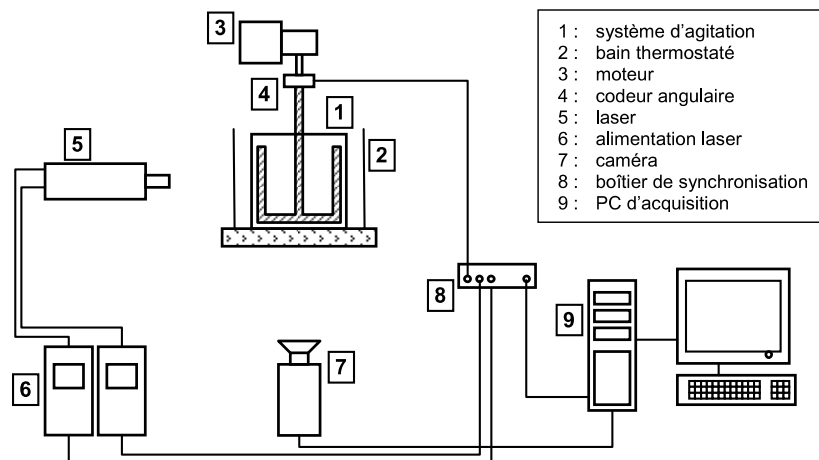


FIG. 2 – Schéma du dispositif expérimental.

## 2.2 Mise en évidence de glissement sur les parois

Dans une première série de mesures, les parois de la cuve en plexiglas sont lisses et transparentes. La figure 3 présente les profils de vitesse tangentielle réduite  $V_{\theta}^* = V_{\theta} / \pi N D_v$  dans le plan horizontal médian (soit à une hauteur  $h = H/2$  du fond de la cuve) et sur la médiatrice de l'agitateur pour 4 fréquences de rotation  $N$ . On observe un phénomène de glissement sur la paroi de la cuve (soit pour  $r^* = 2r/D_v = 1$ ), et celui-ci est d'autant plus important que  $N$  est faible. Ceci est cohérent avec les problèmes de glissement observés en rhéométrie pour les faibles vitesses de cisaillement (jusqu'à environ  $10s^{-1}$  avec des géométries lisses pour la solution de Carbopol). Le collage d'un sable (granulométrie entre  $250$  et  $315\mu m$ ) sur la paroi verticale de la cuve, à l'exception d'une tranche horizontale de  $4mm$  destinée à permettre le passage de la nappe laser, a permis de forcer une condition de non glissement ainsi que le montre la figure 4.

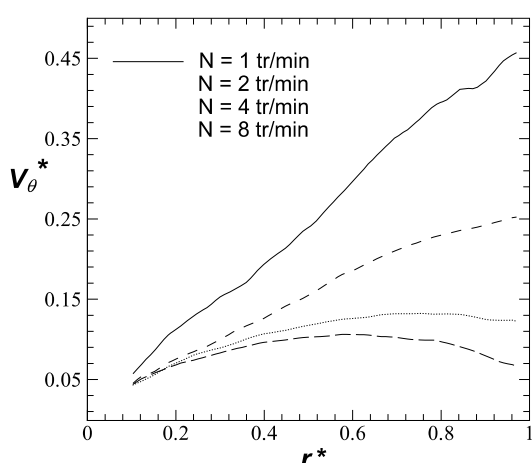


FIG. 3 – Profil de vitesse tangentielle, influence de la fréquence de rotation sur le glissement.

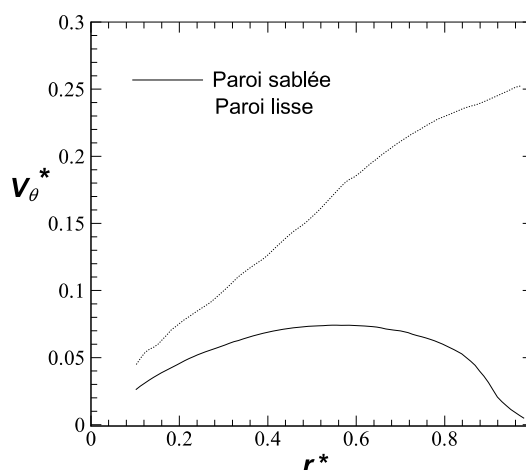


FIG. 4 – Influence de la rugosité de la paroi de la cuve –  $N = 2$  tr/min

### 3 Résultats

#### 3.1 Etude en fluide newtonien

Les figures 5 et 6 présentent les profils de vitesse tangentielle réduite obtenus en fluide newtonien pour des nombre de Reynolds ( $Re = \rho ND^2 / \eta_n$ ) de 14 et 70. La comparaison avec des résultats de simulation numérique (Marouche, 2002) est tout à fait satisfaisante.

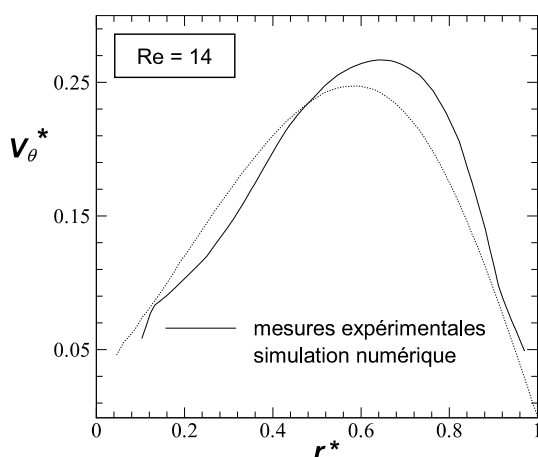


FIG. 5 – Profils de vitesse tangentielle en fluide newtonien - Re = 14

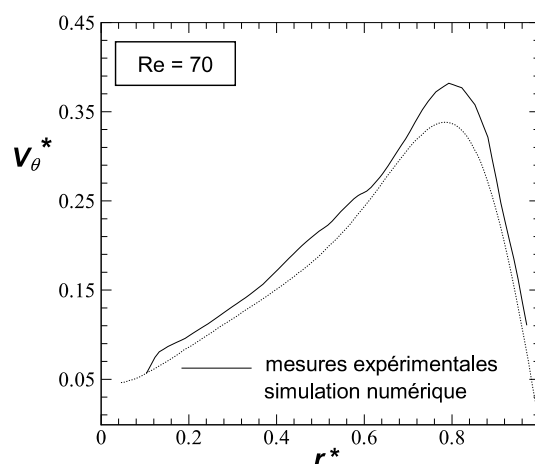


FIG. 6 – Profils de vitesse tangentielle en fluide newtonien - Re = 70

#### 3.2 Etude en fluide viscoplastique

La figure 7 présente les champs de vitesse adimensionnés obtenus par PIV (la même échelle est utilisée pour les deux tracés). Si l'on excepte les zones où les mesures sont difficiles, c'est-à-dire au voisinage du plan vertical de l'agitateur (pales et zone d'ombre de la traverse inférieure de l'ancre), on observe des vitesses globalement plus faibles dans le cas viscoplastique ainsi que des structures d'écoulement différentes au voisinage des pales.

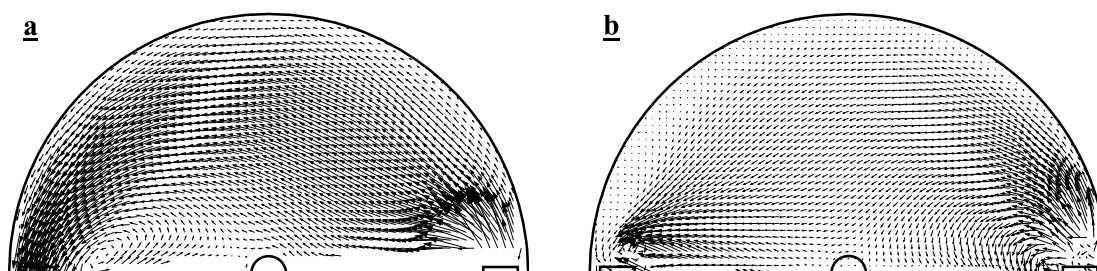


FIG. 7 – Champs de vitesse, a : en fluide newtonien ( $N = 10$  tr/min)  
b : en fluide viscoplastique ( $N = 7$  tr/min)

Les figures 8 et 9 montrent l'évolution avec la fréquence de rotation des profils de vitesse tangentielle réduite  $V_\theta^* = V_\theta / \pi ND_v$  sur un rayon situé à  $10^\circ$  devant la pale et sur la médiatrice de la pale. On observe sur la figure 8 une forte dispersion des mesures expérimentales pour des rayons compris entre 0.8 et 1. Ceci est dû aux difficultés de mesures dans cette zone proche de

la pale, difficultés qui augmentent lorsque la vitesse s'accroît. Les profils réduits semblent dépendre peu de la fréquence de rotation  $N$  dans la zone proche du plan de la pale (Fig. 8). On remarque par contre une évolution sur la médiatrice où seuls les profils établis pour les plus basses vitesses (2 et 7 tr/min) sont superposés (Fig. 9). Dans la gamme des vitesses de rotation de l'agitateur étudiées, la vitesse tangentielle réduite dans la cuve augmente avec la fréquence de rotation mais elle reste très faible en raison de l'effet du seuil et, en tous cas, bien plus faible qu'avec le fluide newtonien.

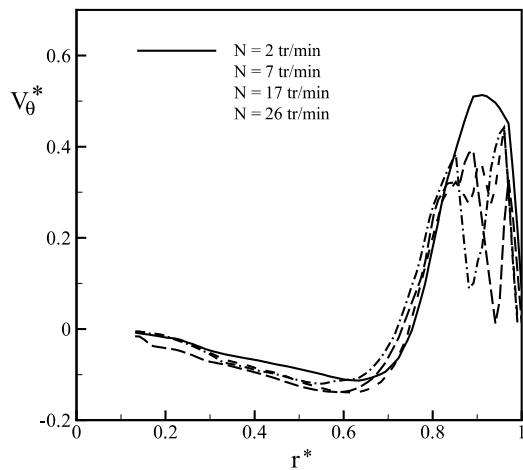


FIG. 8 – Profils expérimentaux de vitesse tangentielle sur un rayon à  $10^\circ$  devant la pale.

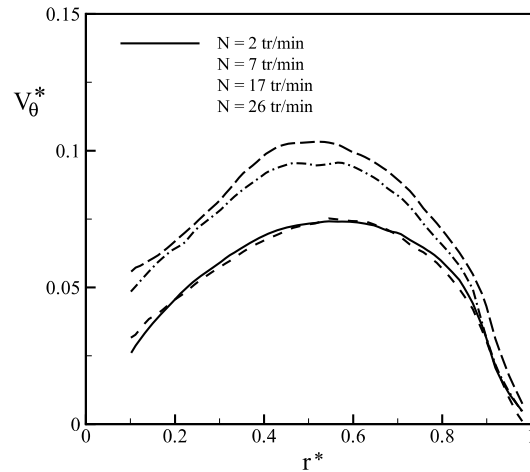


FIG. 9 – Profils expérimentaux de vitesse tangentielle sur la médiatrice de l'ancre.

Les figures 10 et 11 permettent de comparer, pour une fréquence de rotation donnée ( $N = 7 \text{ tr/min}$ ), les profils de vitesse réduite obtenus expérimentalement et les résultats d'une simulation numérique effectuée avec une loi de Herschel-Bulkley dont les paramètres ont été ajustés expérimentalement (Marouche, 2002). Le nombre de Reynolds généralisé  $Re_g = \rho N^{2-n} D^2 / K$  est inférieur à 0.1 et l'écoulement est non inertiel. Les profils newtoniens non inertiels ont donc également été reportés sur ces figures pour élargir la comparaison.

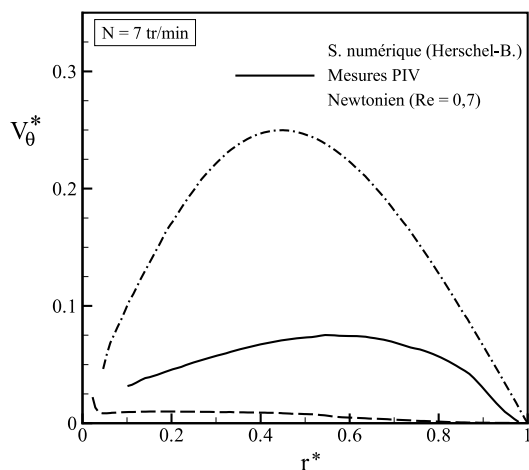


FIG. 10 – Profils de vitesse tangentielle sur la médiatrice de l'ancre .

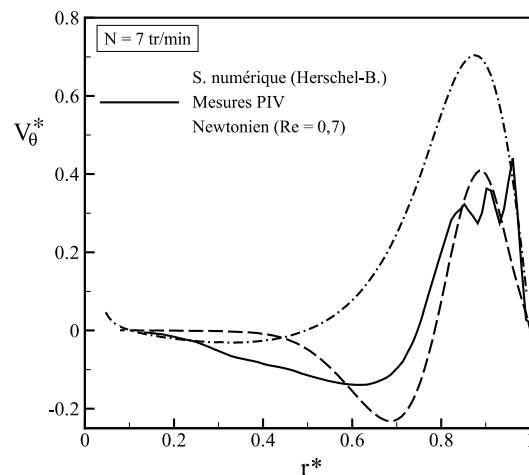


FIG. 11 – Profils de vitesse tangentielle sur un rayon à  $10^\circ$  devant la pale.

On observe que les profils expérimentaux sont très différents des profils newtoniens et font apparaître une très forte diminution de la vitesse tangentielle, effet que l'on retrouve de façon plus marquée dans la simulation numérique en fluide de Herschel-Bulkley. La localisation de l'écoulement autour des pales, qui a été observée numériquement pour les faibles vitesses de rotation, existe également sur les mesures expérimentales (Fig. 9 et 11) mais a toutefois un contour plus flou. Des résultats similaires sont obtenus sur les autres fréquences de rotation.

#### 4 Conclusions

L'étude expérimentale fine du champ local de vitesse dans une cuve de mélange contenant un fluide ayant un seuil d'écoulement important a été menée essentiellement dans le but de corroborer des résultats théoriques et numériques sur ce type d'écoulement. Des difficultés ont été rencontrées en particulier au voisinage des zones de paroi. Ainsi l'effet de glissement mis en évidence sur la paroi de la cuve, phénomène classique dans ce type de fluide, a été résolu par l'ajout de rugosités. De même, les mesures ont été délicates au voisinage de l'agitateur en mouvement surtout au bord d'attaque. La comparaison avec les résultats numériques souffre de ces particularités. Cependant, on constate que les comportements qualitatifs sont bien reproduits dans les cas faiblement inertiels étudiés. L'effet du seuil d'écoulement sur l'hydrodynamique est bien pris en compte. On constate cependant des différences sur les profils de vitesse qui nous amènent à mettre en question l'implémentation des modèles rhéologiques dans ce cas. On observe en particulier des différences relativement importantes dans les zones de faible cisaillement. Le comportement rhéologique retenu aux très faibles vitesses de cisaillement ainsi qu'une évolution progressive des caractéristiques du fluide au cours des expérimentations pourrait en être la cause mais ce point reste à éclaircir.

#### Remerciements

Les auteurs remercient E. Cid et S. Cazin du service Signaux et Images de l'IMFT pour les avoir assistés dans la mise au point de la chaîne de mesure PIV en leur permettant de bénéficier de leur large expérience en métrologie optique.

#### Références

- Hirata, Y., Aoshima, Y. 1996 Formation and growth of cavern in yield stress fluids agitated under baffled and non-baffled conditions. *Chem. Eng. Res. Des* **74** n°4, 438-444
- Ein-Mozaffari, F., Bennington, C. P. J., Dumont, G. A. 2005 Suspension yield stress and the dynamic response of agitated pulp chests. *Chem. Eng. Sc.* **60**, 2399-2408.
- Bertrand, F., Tanguy, P. A., Brito De La Fuente, E. 1996 A new perspective for the mixing of yield stress fluids with anchor impellers. *J. Chem. Eng. Jap.* **29** n°1, 51-58
- Curran, S. J., Hayes, R. E., Afacan, A., Williams, M., Tanguy, P. 2000 Experimental mixing of a yield stress fluid in a laminar stirred tank. *Ind. Eng. Chem. Res.* **39**, 195-202
- Anne-Archard, D., Marouche, M., Boisson, H. C. 2006 Hydrodynamics and Metzner-Otto correlation in stirred vessels for yield stress fluids. *Chem. Eng. J.* **125** n°1, 15-24
- Marouche, M. 2002 Hydrodynamique d'un système d'agitation en fluide viscoplastique et en régime laminaire inertiel. *Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse.*
- S. Maurel 2000 Etude par imagerie laser de la génération et de la rupture d'un écoulement tourbillonnaire compressé. Situation modèle pour la validation de simulations aux grandes échelles dans les moteurs. *Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse*