



MÉLANGE NEWTONIEN ET NON NEWTONIEN AU SEIN D'UNE CUVE DE MÉLANGE AGITÉE.

Mahmoud El Hajem^a, Serge Simoëns^a, Alexandre Delache^{a,c}, Min Quan Nguyen^a, Trong Dai Nguyen^a, Jean-louis Balint^b, Corally Bailly^a

(a) LMFA, CNRS, École Centrale de Lyon, INSA de Lyon et Université Lyon 1, Écully, France

(b) Department of Mechanical Engineering, University of Maryland, College Park, USA.

(c) LMFA, Université de St-Etienne, France.

*Correspondant : serge.simoens@ec-lyon.fr

Résumé : L'influence du caractère non Newtonien d'un fluide sur la turbulence est encore mal connue dès lors que l'on aborde la modélisation classique du mélange turbulent. Les modèles de turbulence\conformation permettent difficilement de reproduire numériquement un écoulement turbulent si le fluide est non Newtonien et en particulier rhéofluidifiant. Cela est encore plus vrai lorsque l'on veut reproduire un écoulement complexe comme celui qui a lieu dans une cuve agitée. En tout état de cause la littérature ne produit pas suffisamment de données de validation pour valider ou améliorer ces modèles que ce soit en mélange turbulent fondamentale ou en mélange turbulence appliquée. Nous allons ici présenter les premiers résultats relatifs au champs de vitesse au sein d'une cuve de mélange Holland et Chapmann avec turbine Rushton avec dans une première expérience de l'eau et dans une seconde expérience un rhéofluidifiant. L'objectif de ce travail est de fournir une base de donnée pour la validation mais aussi des informations sur le comportement du mélange turbulent en fonction du caractère Rhéofluidifiant d'un fluide. L'étude se fait à l'aide de la PIV.

Introduction

Le mélange turbulent en milieu rhéofluidifiant est encore difficile à modéliser car la compréhension de l'interaction turbulence/polymère, de l'échelle moléculaire aux échelles classiques de la turbulence en milieu continu, reste à être confirmée voire modifiée. La théorie énergétique de De Gennes [1] relative à l'influence de l'élasticité sur le spectre de turbulence reste à vérifier. Malgré la forte augmentation des capacités de calcul à l'aide des calculateurs parallèles, les développements numériques par la résolution directe d'une turbulence homogène isotrope à fort Reynolds est impossible [2]. Cela est encore plus vrai lorsque l'on veut calculer l'écoulement au sein d'une cuve agitée. Cela nécessite l'utilisation de modèles de turbulence qui restent à améliorer et à valider.

La difficulté de réaliser des expériences, avec les moyens de la métrologie optique comme la VIP (Vélocimétrie par Images de Particules) à l'aide de polymères rhéofluidifiants réside dans leur fragilité et leur non transparence. D'autres parts la caractérisation du régime est complexe à cause d'une forte viscosité initiale mais d'une viscosité très faible (relativement à l'initiale) dans les zones à fortes contraintes de l'écoulement. Ces dernières zones sont alors très souvent localement turbulentes, même si l'écoulement, caractérisé par le Reynolds nominal et

la vitesse motrice, prédisent un écoulement laminaire. Nous avons déjà réalisé une étude comparatrice entre Newtonien et non Newtonien dans un écoulement de mélange de jonction en T [3]. Cette étude a permis de démontrer, pour le champ de vitesse et pour le champ de concentration d'un scalaire passif, marquant initialement une seule partie de l'écoulement, l'influence des propriétés, élastique et rhéofluidifiante, sur la turbulence et la dispersion turbulente du scalaire passif. Nous comparons pour le présent écoulement confiné, de la même façon que ce travail précédant, les champs de vitesse en Newtonien (eau) et non Newtonien (gomme de Xanthane). Nous comparerons ici les composantes radiale et verticale du champ moyen de la vitesse moyenne et les valeurs rms des fluctuations du champ de vitesse. Les mesures sont réalisées à l'aide de la VIP.

Dispositif expérimental

Pour le montage expérimental on utilise une cuve transparente cylindrique de 50cm de haut et de 30 cm de diamètre (figure 1). Elle est circonscrite par une cuve carrée. Les parois sont en verre. La cuve cylindrique est remplie à une hauteur de 30cm d'eau pour l'expérience en Newtonien et de Gomme de Xanthane à 0,1% masse dans de l'eau pour l'expérience en non Newtonien.

La cuve carrée est remplie d'eau quelque soit l'expérience afin d'éviter les déformations de prise de vue dues aux passages des interfaces air/verre. Le fond de la cuve est plat. Une turbine Rushton classique à 6 pales est disposée à 10 cm du fond de cuve [5]. le bord est muni de 4 contre-pales verticales.

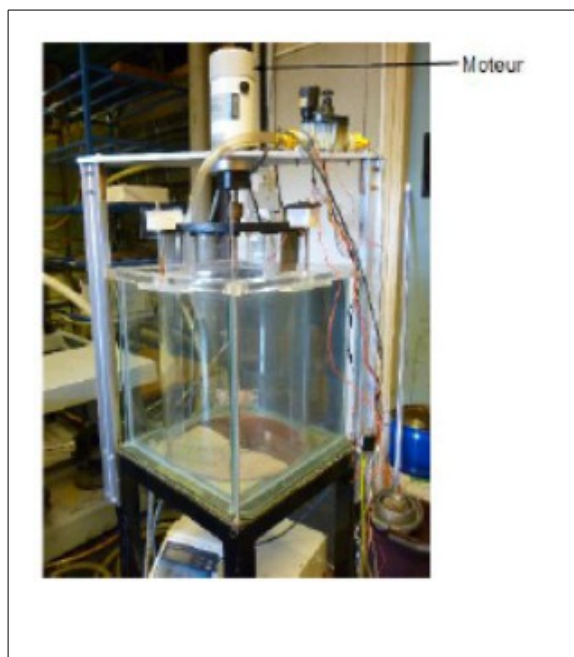


Figure 1 Cuve Holland et Chapman avec turbine Rushton.

Pour l'étude présentée ici est, la rotation du mobile d'agitation est fixée à 100rpm. Le nombre de Reynolds nominal est alors de l'ordre de 14000 en bout de pale. L'écoulement Newtonien est parfaitement turbulent. Cela n'est pas le cas du non Newtonien en bout de pale. A cause de la viscosité initiale (voir figure 2) le nombre de Reynolds nominal sera de l'ordre de 31.

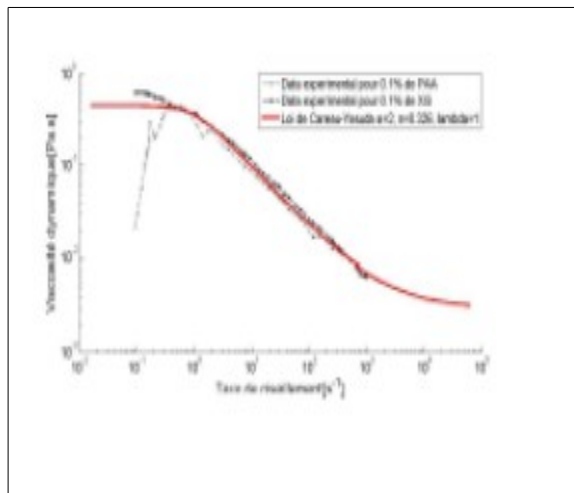


Figure 2 Viscosité par rapport au taux de cisaillement pour 1) le PAA à 0,1% et le Xanthane à 0,1%.

On ensemence les fluides pour la VIP à l'aide des particules fluorescentes utilisées par Nogueira et al. [4]. Elles sont excitées par un laser pulsé Nd : YAG de 150mJ cadencé à 10 Hz. Un système Lavisson est utilisé pour l'analyse. Un bras articulé RD-Vision avec lentilles de collimation et lentille cylindrique permettent de former une nappe laser d'épaisseur estimée à 1mm. Une caméra CMOS PCO4000 est utilisée pour l'enregistrement des images à une fréquence de 1Hz. Le nombre de pixels du capteur de cette caméra (2700*4000) permet l'obtention d'un grand champs de prise de vues simultanément. On a ainsi besoin de 2 zones de prise de vues pour couvrir une moitié diamétrale de la cuve. Un filtre dichroïque passe bande ($\lambda = 532 \pm 8$ nm) permet l'enregistrement de l'intensité fluorescée par les particules solides sans la longueur d'onde due à l'éclairage. Afin d'obtenir une description en volume de l'écoulement on réalise 10 plans verticaux et 10 plans horizontaux. Pour chaque plan on enregistre 1000 paires d'images pour que l'ordre 2 des statistiques liées aux fluctuations turbulentes soient suffisantes. On ne présente ici que les résultats relatifs à un seul plan vertical.

Nous notons qu'une vérification systématique, avant et après chaque expérience, est faite pour contrôler la viscosité du fluide non Newtonien. Les polymères que nous utilisons sont en général « fragiles » et ils est donc nécessaire de vérifier que leur structure soit conservée malgré le fort cisaillement local due au passage des pales.

Résultats

On présente tout d'abord (figure1) le champs de vitesse moyenne de l'écoulement en eau puis celui obtenu pour une concentration de 0.1% en masse de gomme de Xanthane dans de l'eau. Nous savons que le nombre de Reynolds initial est complètement différent. Néanmoins en figure 2 on voit que la viscosité de la gomme de Xanthane tend vers celle de l'eau pour de forts cisaillements locaux. Ainsi localement on devrait atteindre le même type de régime et donc de comportement dynamique.

Le comportement dans le plan vertical présenté est globalement similaire que ce soit en présence du fluide Newtonien ou non Newtonien. Il se caractérise par un jet en bout de pale et deux tourbillons vers la paroi de la cuve. Pour ce champ moyen, on note que le jet est beaucoup plus épais dans le cas Newtonien que dans le cas de la gomme de Xanthane. Ainsi la dispersion turbulence semble beaucoup plus importante pour le cas Newtonien. Malgré les fortes contraintes de bout de pale la viscosité ne chute pas suffisamment rapidement pour que le régime soit fortement turbulent contrairement au cas du

mélangeur en T([3]). Le temps de relaxation lié au polymère est trop court.

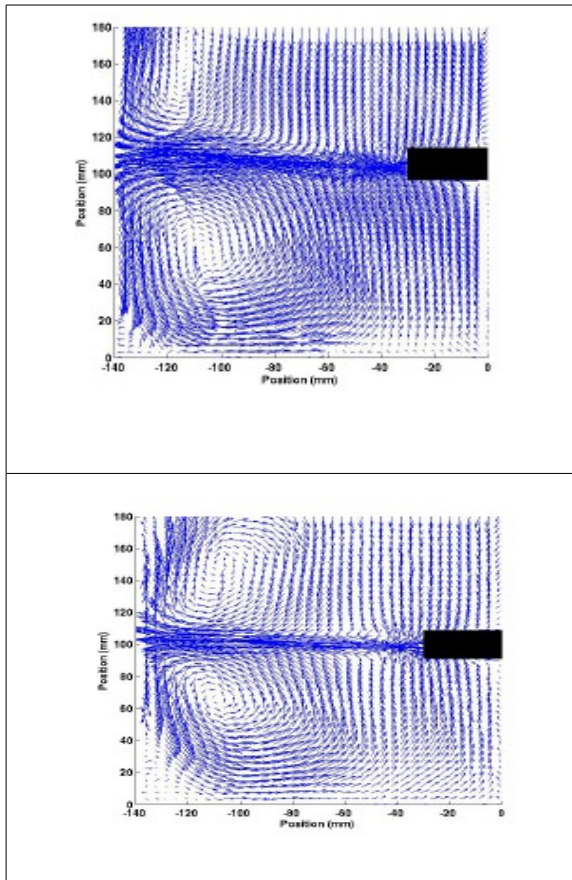


Figure 3 Exemple d'un champ de vitesse moyenne dans un plan vertical passant par l'axe de la cuve. Rotation du mobile 100 rpm, fluide : eau.

Nous allons maintenant présenter le champs de vitesse moyenne composante par composante. En figure 4 est représentée la composante horizontale. On trace en particulier des lignes iso-vitesses. Cela permet de confirmer ce que nous avons analysé à partir du champ vectoriel moyen: l'épaisseur du jet non Newtonien est 2 fois moins importante que celle du jet Newtonien. Par contre l'intensité longitudinale est du même ordre de grandeur.

On voit figure 5 la composante verticale de la vitesse moyenne pour le plan vertical présenté ici. On voit que la structure dynamique est la même pour les deux fluides mais que les intensités sont nettement plus faibles dans le cas non Newtonien. L'intensité de l'écoulement vertical est moins dispersé importante.

Les Figures 6 et 7 représentent les valeurs rms (root mean square) des fluctuations des composantes horizontales et verticales de la vitesse. La figure 6 montre une nette différence d'intensité de la composante horizontale entre Newtonien et non

Newtonien. La turbulence est présente en non Newtonien mais est moins intense. Le maximum de turbulence est plus proche de la pale pour le non Newtonien. Ainsi cette turbulence a une tendance a plus s'étendre en bout de pale que pour le cas Newtonien. Le temps de relaxation du polymère est suffisamment lent pour que le fluide non Newtonien soit contraint localement et que sa viscosité locale atteigne une valeur proche de la viscosité de l'eau en bout de pale. La zone de fortes contraintes ne dépasse pas une à deux largeur de pale. Plus loin de la pale cet effet est oublié par le fluide qui n'est alors plus assez contraint pour permettre à la turbulence de se développer. Elle s'éteint alors plus rapidement que dans le cas non Newtonien.

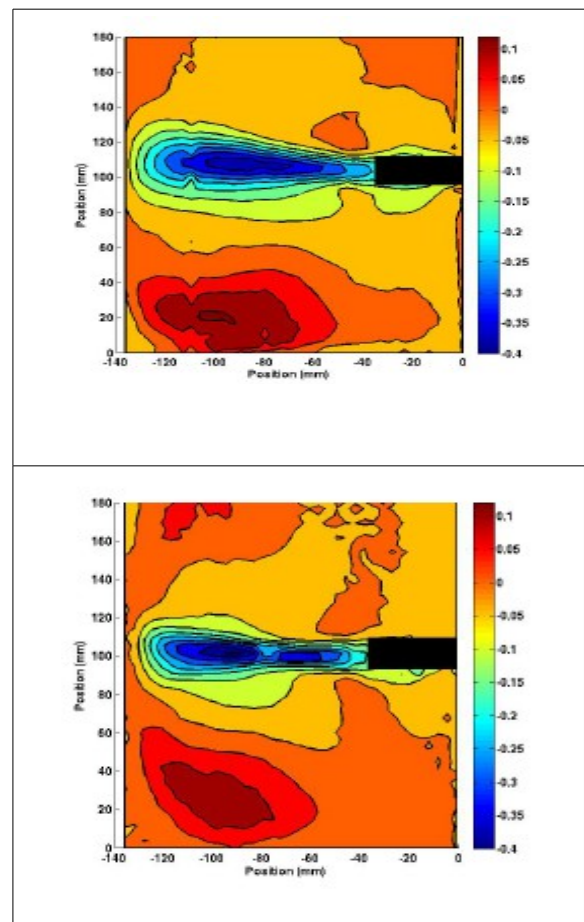


Figure 4: Même station verticale. Composante longitudinale de la vitesse moyenne. a) Eau, b) Xanthane.

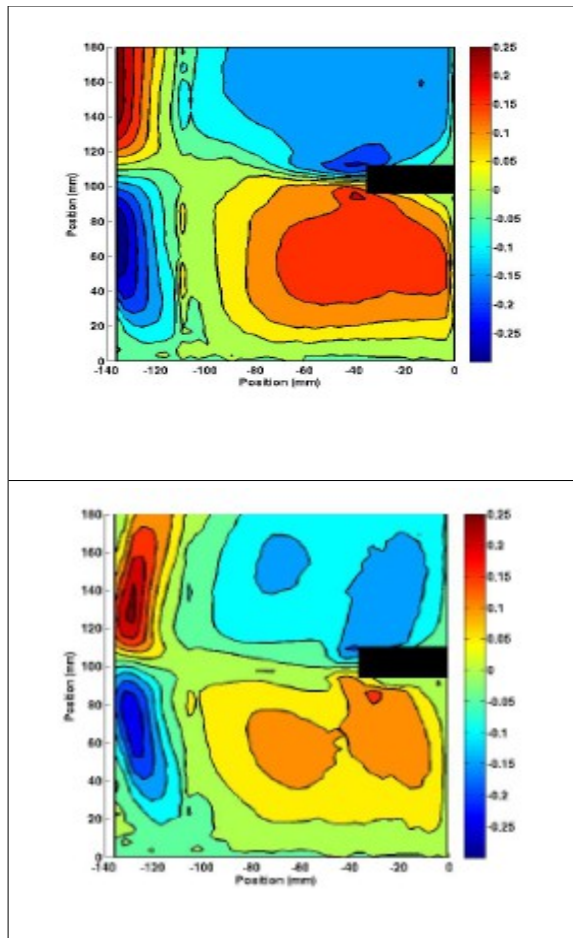


Figure 5 Môme station verticale. Composante Verticale de la vitesse moyenne. a) Eau, b) Xanthane.

Sur la figure 7 on voit la valeur rms des fluctuations de la composante verticale du champ de vitesse dans le plan vertical présenté ici. La composante verticale montre que la turbulence augmente de nouveau pour l'écoulement proche de la paroi opposée à la pale. Cela n'est pas du au jet mais plus probablement aux tourbillons moyens qui produisent un cisaillement moyen local suffisamment intense pour refluidiser (la viscosité baisse) dans cette zone et ainsi augmenter le régime local. Cette zone correspond aussi à la zone d'influence de la contrepale mais le cisaillement qu'elle induit est vertical. L'effet direct ne peut donc être visualisé dans le plan présenté. Une analyse des plans horizontaux sera nécessaire pour savoir si le cisaillement horizontal est suffisamment intense pour produire une telle fluidification. A priori l'intensité est négligeable devant celle due aux tourbillons moyens verticaux.

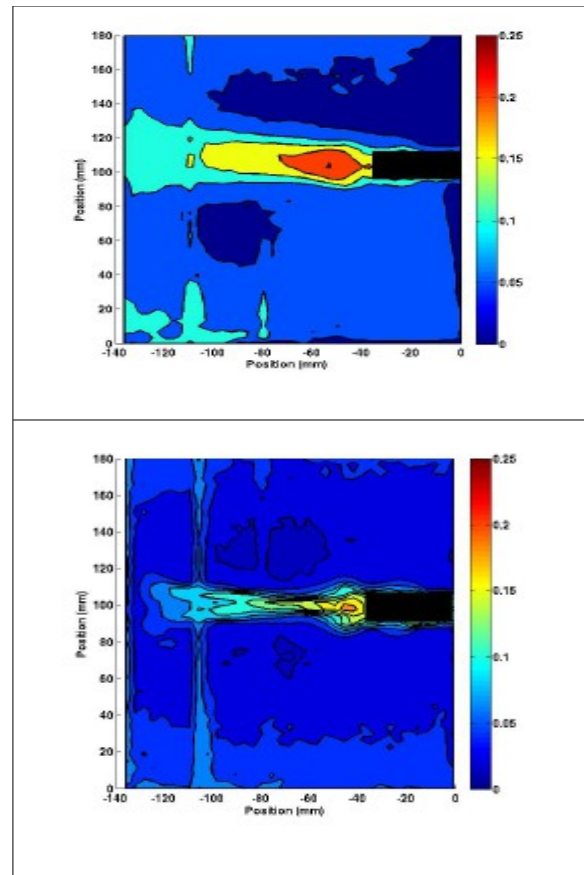


Figure 6 : Môme station verticale. RMS de la composante Horizontale de la vitesse moyenne. a) Eau, b) Xanthane.

On présente figure 8 l'énergie cinétique turbulente totale de l'écoulement pour les deux fluides. On voit figure 8 que l'énergie cinétique turbulente est assez constante et intense le long de l'axe du jet contrairement au cas Newtonien pour lequel cette énergie décroît de façon classique.

Ainsi le comportement turbulent est différent dans le cas du non-Newtonien. Pour ce fluide, localement, la turbulence peut augmenter en s'éloignant de la source motrice. Cela n'était pas visible avec le champ moyen.

Comme nous l'avons vu avec la composante verticale des fluctuations, cela est à attribuer au cisaillement moyen du aux grands tourbillons existants de part et d'autre de l'axe du jet de bout de pale.. Cette tendance est la même que celle observée dans le cadre de l'étude d'un mélangeur en T ([3]). Ainsi le cisaillement local est prépondérant sur celui de paroi, ce qui était le mécanisme privilégié par Lumley([6]) Contrairement au cas du T l'énergie cinétique turbulente subit une ré-augmentation vers la paroi et n'est pas auto-entretenu par la turbulence locale. Le cisaillement turbulent n'est donc pas dans le cas de la cuve suffisant pour refluidifier. C'est une différence notable par rapport au mélange en T..

Il sera intéressant dans le futur de vérifier que ce comportement est similaire quelque soit le régime

utilisé ou existe-t-il un régime pour lequel l'écoulement dans une telle cuve peut produire un écoulement turbulent suffisamment intense pour entretenir la turbulence le long de l'axe du jet. Notons que malgré la présence de la contre-pale vers la paroi, le cisaillement local ne permet pas, dans cette zone, de refluidifier et ainsi d'augmenter le régime local. L'augmentation du régime local le long de l'axe est donc bien due au tourbillon moyen et non pas à un effet de paroi (contre-pales).

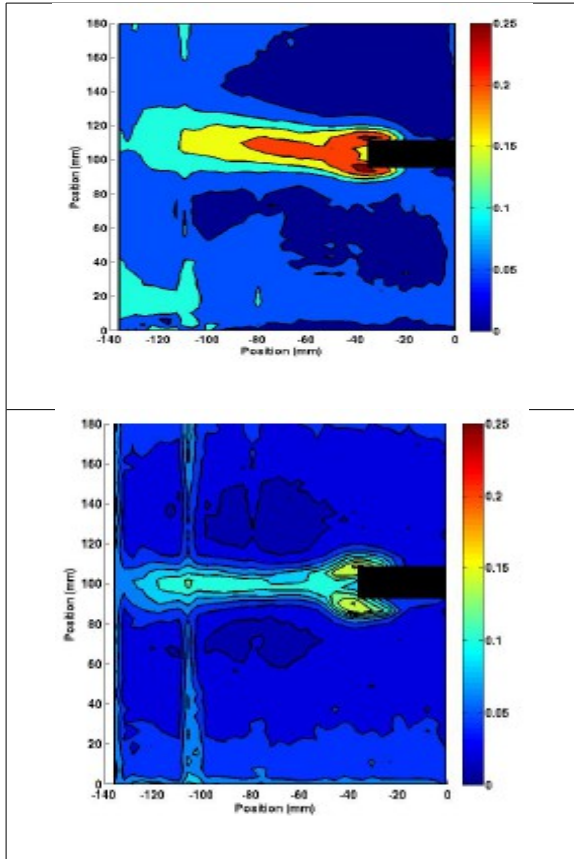


Figure 7 Même station verticale. RMS de la composante Verticale de la vitesse moyenne. a) Eau, b) Xanthane.

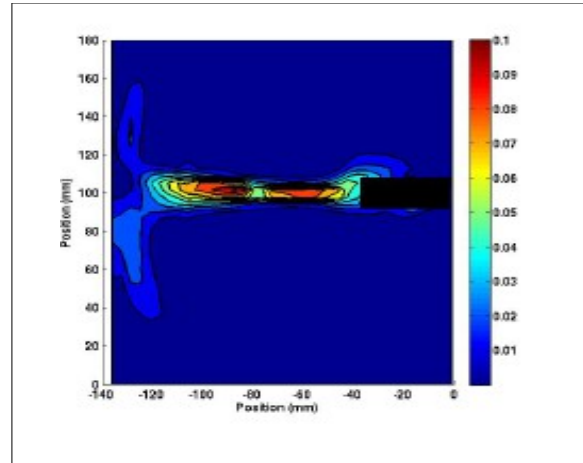
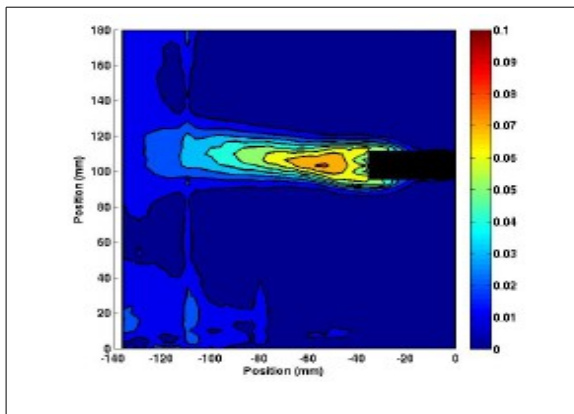


Figure 8 Energie cinétique turbulente a) Eau, b) Xanthane.

Conclusions

Nous avons présenté des mesures du champ moyen de vitesse ainsi que l'énergie cinétique turbulente des fluctuations de ce champ. Comme pour le cas de la jonction en T [3] on démontre que le déclin de la turbulence non Newtonienne a un comportement différent du Newtonien. Il s'avère que l'énergie cinétique ré-atteint un maximum le long de l'axe du jet de bout de pale avant d'atteindre la zone des contre-pales. Cela confirme la théorie de de Gennes qui complète voire contredit celle de Lumley. Localement, sans la présence de parois le cisaillement peut entretenir la fluidification et donc augmenter le régime local. L'écoulement moyen est similaire dans le cas des deux fluides malgré une viscosité initiale beaucoup plus importante en non Newtonien. Le jet moyen est moins épais en non Newtonien mais concentre toute l'énergie le long de l'axe sans expansion transverse due à la dispersion turbulente. Cela est vrai car le temps de relaxation de ce polymère est suffisamment court. Pour d'autres polymères ce temps est différent et le comportement de l'écoulement peut être modifié. Nous avons de plus choisi un polymère pour lequel l'élasticité, à cette concentration, est négligeable. Il sera intéressant dans le futur de voir quel est l'influence de cette dernière propriété sur la turbulence.

References

[1] De Gennes, P.G.: Toward a scaling theory of drag reduction, *Physica* 140A, 9-25, 1986
 [2] Perlecar P., Mitra D. et Pandit R, Direct numerical simulations of statistically steady homogeneous, isotropic fluid turbulence with polymere additives, *Physical Review E*, 82(6), 066313, 2010.

- [3] Nguyen T.D., Simoëns S. et El Hajem M., "étude d'un mélange turbulent pour un fluide non Newtonien, 13ème CFTL, CFTL-2012, Rouen, 18-21 Septembre 2012.
- [4] J.Y. vinçont, L. Broquet et S. Simoëns, Mesure de concentration par fluorescence induite par laser et profils de similitude dans un réacteur agité, pp143-148, Récents progrès en génie des proc., Vol. 9, 41, 1995 Ed. Lavoisier Technique et doc..
- [5] Nogueira S., Sousa R.G., Pinto AMFR, Riethmuller, M.L. Et Campos, Simultaneous PIV and Shadowgraphy in slug flow : a solution for optical problems, Exp. In F., 35, 598-609, 2003.
- [6] L.L. Lumley, Drag Reduction, Annual Review of fluid mechanics, 1:367-384, 1969.