

# Etude d'un mélange turbulent pour un fluide non-Newtonien

*Trong Dai NGUYEN, Serge SIMOËNS, Mahmoud EL HAJEM*

*LMFA, ECL, INSA de Lyon, UCB Lyon I, UMR CNRS 5509*

## Introduction

L'objectif principal de ce travail est d'étudier le comportement du transport turbulent d'un scalaire passif au sein d'un fluide non-newtonien. L'étude a été menée pour une géométrie simple d'un T classique dans le but de mieux comprendre l'influence du caractère rhéofluidifiant du fluide sur l'évolution du transport de scalaire passif. L'expérience a été réalisée pour 2 régimes différents et différents types de fluides non-Newtoniens. L'écoulement en T est connu pour un fluide newtonien et relativement bien décrit en ce qui concerne les conduites carrées avec un ratio de côté de section des deux branches supérieur à  $2^{1-2}$ . A notre connaissance, il existe moins de description complète pour un T avec des branches cylindriques et de ratio de diamètre égal à 1. A fortiori, le transport scalaire pour un scalaire passif contenu dans une des deux branches pour un fluide non Newtonien a été peu ou pas étudié.

Nous présentons ici la partie expérimentale de ce travail. L'analyse de l'écoulement sera réalisée à partir de mesures du champs de vitesses obtenus par vélocimétrie par images de particules (VIP) et de mesures du champs de concentration par Fluorescence Induite par Plan laser (PFIL). La combinaison des 2 techniques nous a permis d'obtenir les corrélations des deux champs afin de remonter au flux de masse<sup>6,7</sup>. Dans une première expérience, l'écoulement est celui d'un fluide newtonien (eau pure). Dans une seconde expérience, une solution aqueuse de polyacrylamide cationique de type Zetag<sup>3</sup> est employée comme fluide rhéofluidifiant. Il existe peu de travail expérimental concernant le transport turbulent de scalaires passifs avec des fluides non-newtoniens. Nous avons choisi une configuration en T, relativement simple, de façon à comparer l'écoulement d'un fluide non-newtonien et celui d'un fluide newtonien. Nous présenterons ici les statistiques classiques d'ensemble pour le champs de concentration ainsi que pour la corrélation des deux champs. En particulier nous nous intéressons à la valeur moyenne, à l'intensité des fluctuations et aux corrélations des fluctuations des deux champs. Nous comparerons les statistiques obtenues pour l'écoulement avec fluide non-Newtonien avec celles obtenues pour le fluide Newtonien. Nous concluons sur l'influence du caractère non-Newtonien d'un fluide sur le transport turbulent de scalaire passif.

## Matériels et méthodes

Le montage pour cette étude est réalisé avec un T en plexiglass. De plus une cage rectangulaire enserme le T afin de limiter les déformations dues aux changements d'indice de réfraction. Deux bacs d'alimentation de 200 litres avec une faible hauteur de fond sont utilisés pour alimenter l'écoulement de façon gravitaire afin de diminuer les variations de pression au cours de la mesure. Les bacs sont disposés en hauteur de façon à avoir un différentiel de hauteur de 3 mètres par rapport au T, ce qui nous permet d'atteindre les 2 débits que nous souhaitons.

Le fluide arrive simultanément avec le même débit par deux voies perpendiculaires. Le contrôle du débit est fait avec des vannes et des débitmètres électromagnétiques pour éviter les pertes de charge et aussi le cisaillement important qui pourrait initialement modifier la viscosité du fluide non-Newtonien. On utilise des chambres de tranquillisation en amont du T pour minimiser ce problème avant de rentrer dans les 2 branches de la jonction.

Deux caméras synchronisées sont disposées de part et d'autres du plan de visualisation afin de réaliser une mesure simultanée des champs de vitesse et de concentration. Les caméras sont

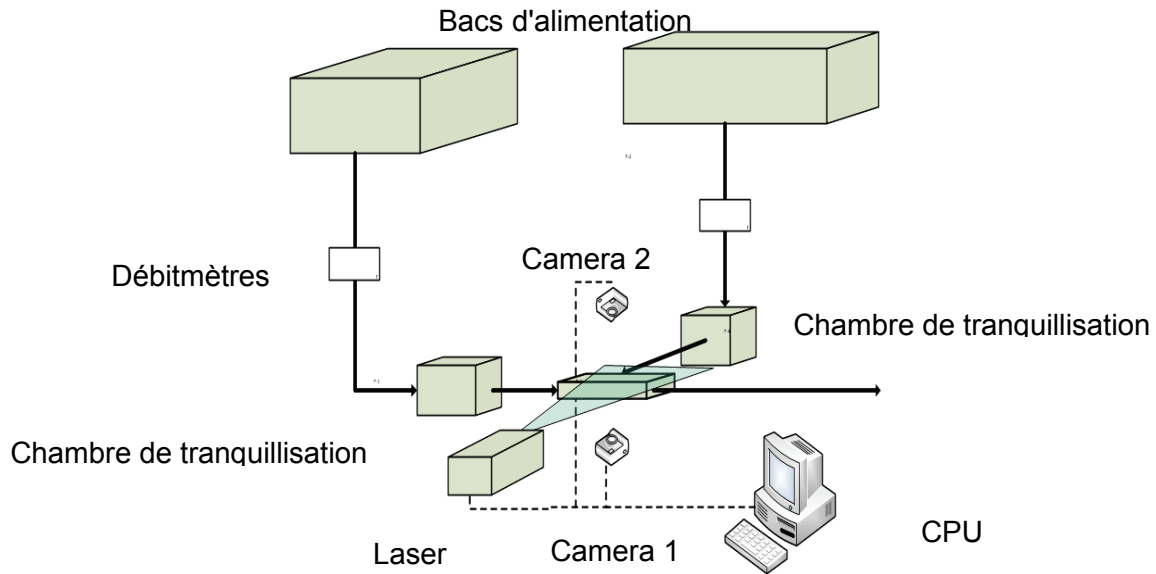


Figure 1 : Montage de mesure expérimentale

contrôlées par un ordinateur et sont synchronisées avec un laser "Yag" de puissance de 150mJ.

On utilise la Fluorescence Induite par plan Laser (FIPL) pour la mesure de concentration et la Vélocimétrie par Image de Particules (VIP) pour la mesure du champ de vitesse. La combinaison des 2 techniques se fait comme développée par Simoëns et Ayrault<sup>6,7</sup>. Un seul des 2 bacs contient de la Rhodamine 6G à une concentration de  $5 \cdot 10^{-5}$  g/l dans de l'eau pour le mélange Newtonien ou dans du ZETAG pour le mélange non Newtonien. L'autre bac contient uniquement le milieu dilué (eau ou Zetag) en fonction du mélange Newtonien ou non-Newtonien. La figure 2 présente un exemple de fluctuations (au sens de Reynolds) de concentration pour l'eau et le PAA. La différence de forme est notable.

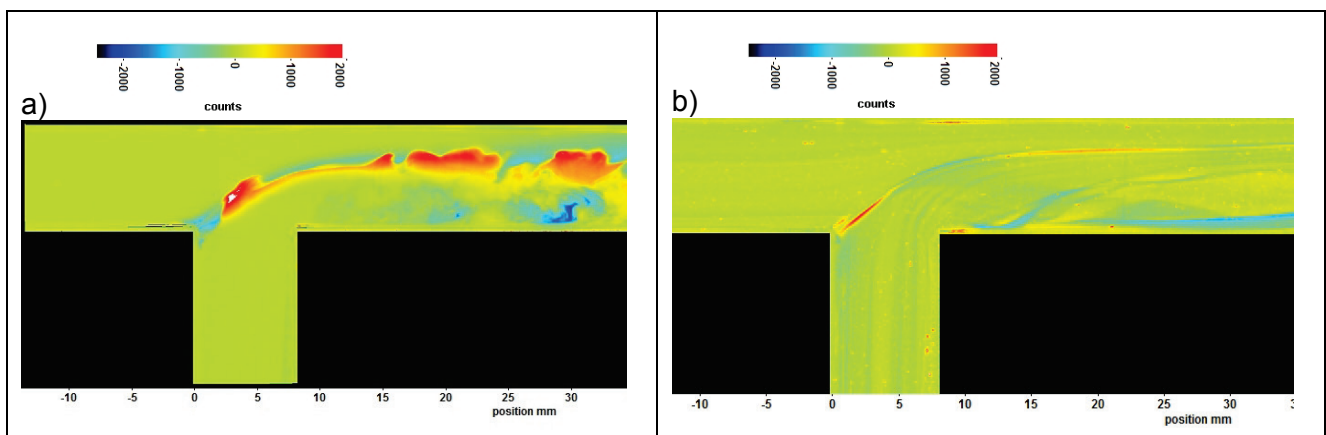


Figure 2 : exemple de champ de fluctuations de concentration instantanée pour a) eau et b) PAA.

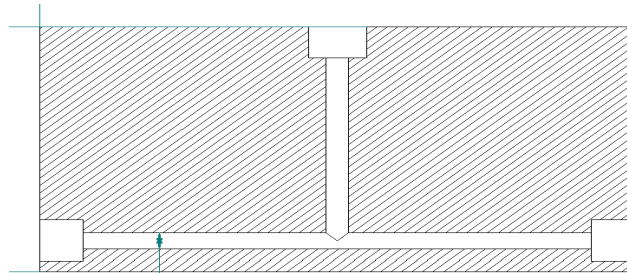


Figure 3 : Le T avec deux entrées perpendiculaires

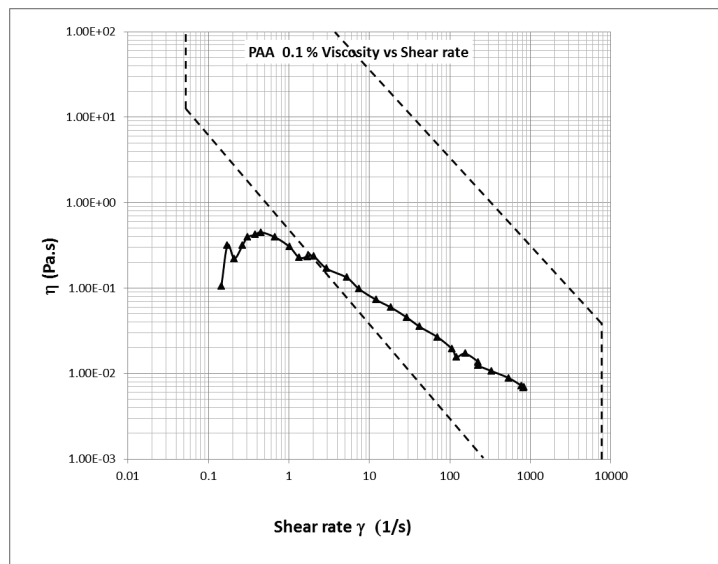


Figure 4 : La viscosité par rapport au taux de cisaillement de polyacrylamide (PAA) à 0,1%

Comme cité en introduction, deux fluides ont été utilisés avec pour but de comparer la différence de comportement des mélanges. L'eau est utilisée comme fluide Newtonien. Une solution de polyacrylamide (PAA) à 0,1% de masse dans l'eau est utilisée comme fluide non-Newtonien, plus précisément comme fluide rhéofluidifiant. Les mesures de la viscosité par rapport au taux de cisaillement (figure 4) de la solution de polyacrylamide nous montrent que la viscosité baisse si le taux de cisaillement augmente.

La viscosité du polyacrylamide peut être définie par la loi de Carreau-Yasuda :

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \left[ 1 + (\lambda \dot{\gamma})^a \right]^{(n-1)/a}$$

où apparaissent cinq paramètres, la viscosité à cisaillement nul  $\eta_0$ , la viscosité à cisaillement infini (ou viscosité du solvant)  $\eta_{\infty}$ ,  $\lambda$ : le temps caractéristique de relaxation du phénomène,  $n$ : l'exposant sans dimension qui est le même que l'exposant de la loi de puissance (Ostwald-de Waele), et  $a$ , le paramètre sans dimension décrivant la transition entre le premier plateau newtonien et la zone en loi de puissance.

Ces différentes constantes ont été, ici, définies à partir des mesures de viscosité en fonction du taux de cisaillement à l'aide d'un rhéomètre *Rheomat RM155*. Le coefficient de la loi puissance calculé sur la courbe de la figure 4 qui donne  $n = 0.517$ . La viscosité à taux de cisaillement nul  $\eta_0 = 0,2 \text{ Pa.s}$ , la viscosité à taux de cisaillement infini  $\eta_{\infty} = 0,001 \text{ Pa.s}$ .

Deux régimes différents ont été étudiés dans les 2 cas de fluides, Newtonien et non-Newtonien : 0,28m/s et 1,3m/s. Ce sont des vitesses aux entrées qui ont été contrôlées à l'aide des débitmètres électromagnétiques.

	V min (m/s)	V max (m/s)
	0,28	1,3
Débit (l/s)	0,014	0,064
Re (eau)	2230	10400

## Résultats

On présente ici des résultats en prenant 1000 réalisations pour chaque champs (vitesse ou concentration). La fréquence de prise de vue permet d'affirmer l'indépendance des échantillons que se soient pour le mélange Newtonien ou non Newtonien. Pour plus de détails concernant les statistiques du champs de vitesse on se reportera à Nguyen et al.<sup>4,5</sup>. On se limitera ici aux statistiques relatives au champ de concentration, ainsi qu'à celles des corrélations des 2 champs.

Pour comparer les deux types de mélange, on a tracé les profils de concentration moyenne et de r.m.s des fluctuations sur deux positions à 12mm et 34mm (figure 5) dans la zone de mélange. Les résultats sont adimensionnés avec la valeur maximale ( $5 \cdot 10^{-5} \text{ g/l}$  de rhodamine).

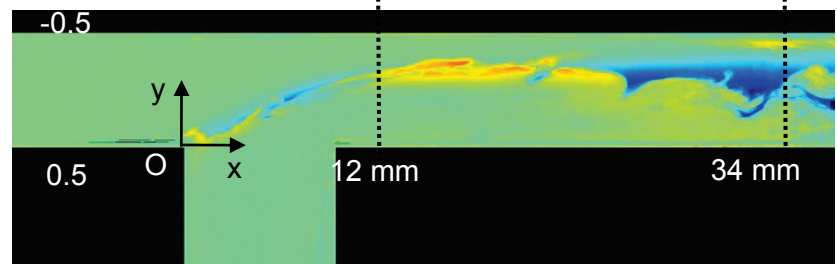


Figure 5 : Les positions des profils étudiés sur une image instantanée des fluctuations du champ de concentration.

Dans la zone proche de la jonction, à 12mm, le mélange commence à s'effectuer. Les positions sont adimensionnées par le diamètre  $D (=8\text{mm})$  du tuyau. On sépare 2 zones de concentration, en bas du tuyau ( $r/D$  de 0 à 0,5) où l'intensité fluorescente moyenne est très grande et proche de 1. Il y a donc peu d'échange dans cette zone.

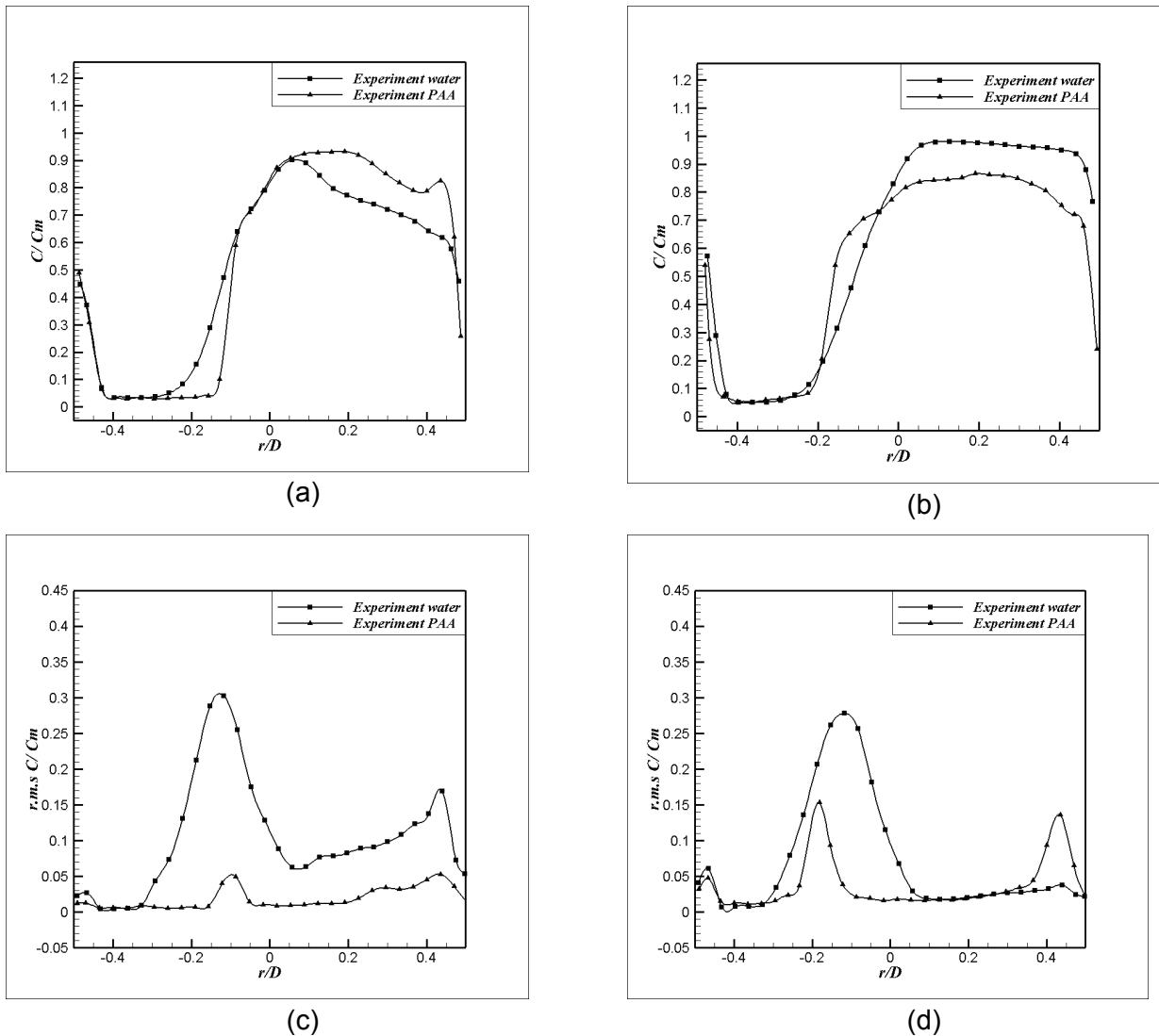


Figure 6 : profils de concentration moyenne et des r.m.s des fluctuations de concentration à 12mm. a) moyenne débit minimal, b) moyenne débit maximal, c) r.m.s débit minimal, d) r.m.s débit maximal.

On obtient une différence plus nette entre les deux types de fluide à la position 34mm. Dans le cas du fluide Newtonien, pour les deux régimes, les profils de concentration moyenne tendent vers la valeur du mélange homogène 0.5. On note cependant entre les 2 régimes une différence de comportement entre le haut et le bas du tuyau. Sachant que les vitesses sont relativement de 0,28 m/s pour le bas régime et de 1,3 m/s pour le haut régime, il semble qu'un mélange homogène soit obtenu plus rapidement pour le régime bas à la position 34 mm. Les profils de concentration moyenne sont nettement différents pour le cas du mélange non-Newtonien. Il existe pour les 2 régimes 1 plateau bien séparé et 2 zones de forte intensité RMS correspondantes aux bas et haut du plateau de la concentration moyenne. Au contraire du cas de Newtonien, le mélange semble réalisé plus rapidement à grand débit puisque le plateau est plus large et plus proche de 0,5 à ce régime.

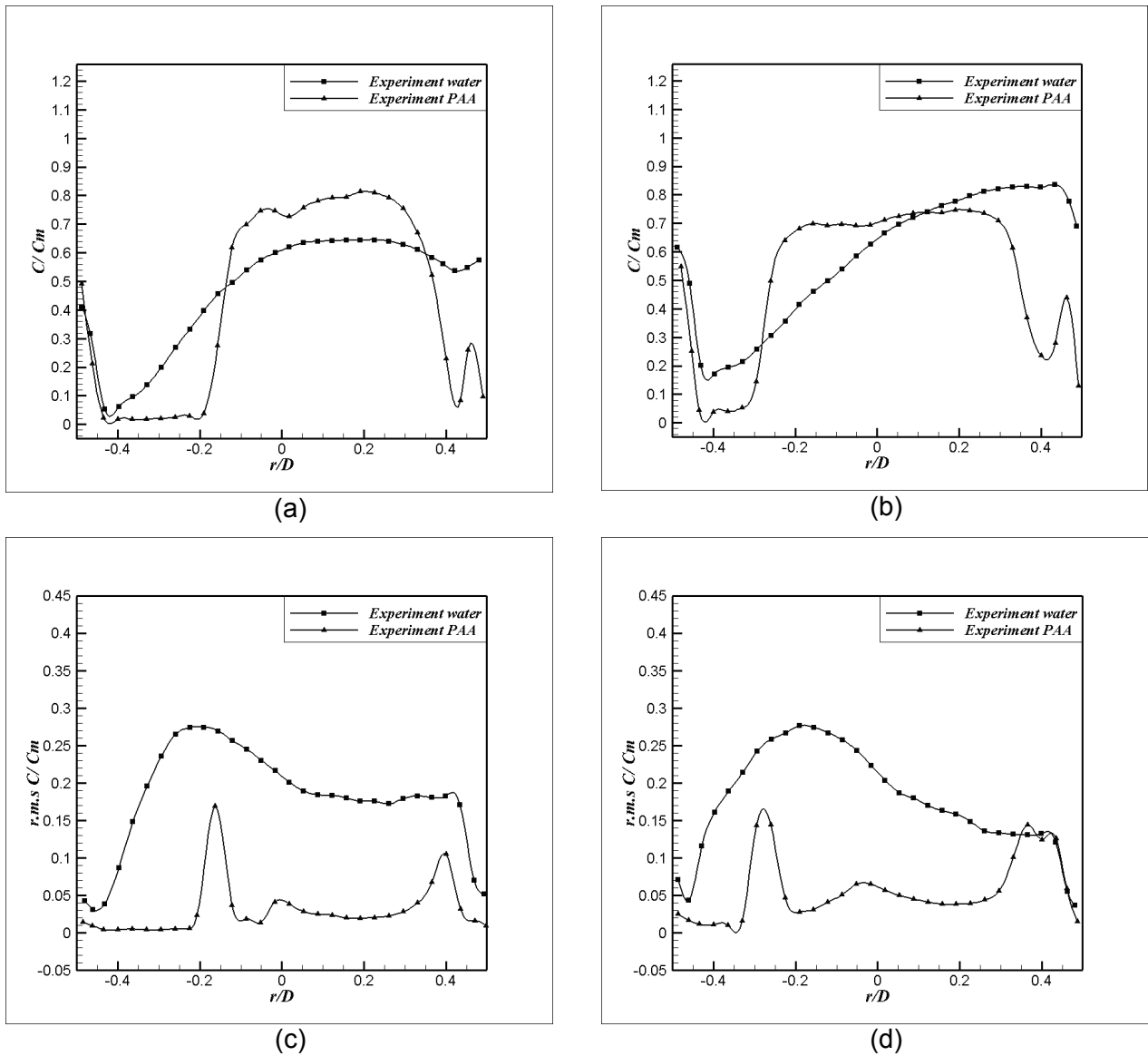


Figure 7 : profils de concentration moyenne et des r.m.s des fluctuations de concentration à 34mm.  
 a) moyenne débit minimal, b) moyenne débit maximal, c) r.m.s débit minimal, d) r.m.s débit maximal.

On présente maintenant les cartes de niveaux correspondantes aux corrélations vitesse transverse-concentration.

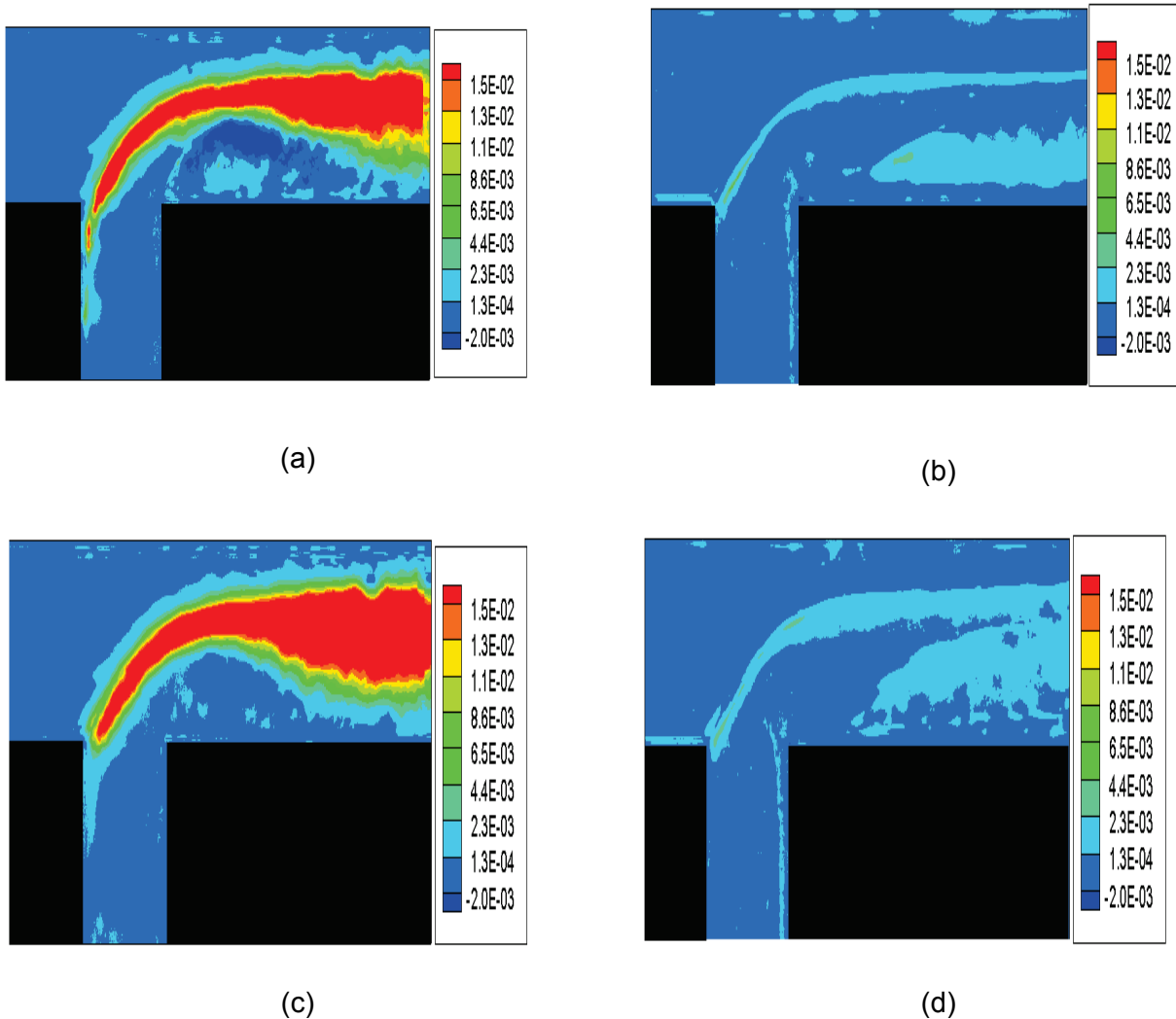


Figure 8 : Cartes des niveaux des corrélations vitesse transverse-concentration a) eau débit minimal, b) PAA débit minimal, c) eau débit maximal, d) PAA débit maximal.

On note une nette différence de niveau entre eau et PAA, ceci quelque soit le régime. Nous avons ici gardé les mêmes échelles de niveau afin de comparaison. On peut voir pour le fluide non Newtonien que les échanges turbulents sont maximaux au sein de la zone de « recirculation sous la zone de mélange entre 12 mm et 24 mm au bas de tuyau.

## Conclusion

Nous avons présenté ici des mesures de concentration et de flux de masse relatives au mélange dans une jonction en T. Nous avons présenté deux régimes différents pour un fluide Newtonien, l'eau et un fluide non Newtonien, le PAA. Les régimes pour l'eau sont turbulents. Pour le PAA cela est plus délicat puisque le fluide est viscoélastique. Le caractère rhéofluidifiant en particulier permet d'obtenir, au niveau des zones de mélange, des viscosités suffisamment basses pour avoir localement de la turbulence, ce que l'on peut juger à l'aide d'un nombre de Reynolds local et la loi de Carreau-Yasuda<sup>5</sup>. On note que les transferts « turbulents » sont nettement inférieurs pour le PAA et localisé dans les zones de plus fortes RMS. Malgré tout, les différences d'amplitude des RMS ne permettent pas d'expliquer que les niveaux des flux soient si bas pour le PAA comparé à l'eau. Nous voyons facilement le rôle de la propriété rhéofluidifiante (viscosité variable). Néanmoins le caractère élastique est toujours présent même si les concentrations du produit non Newtonien sont infimes. Cela peut s'expliquer théoriquement par l'accumulation d'énergie d'origine

élastique en fonction de la concentration du produit. D'autres fluides viscoélastiques ont été testés et permettront de voir plus clair pour expliquer le mélange en présence de fluides viscoélastiques. Cela fera partie d'un autre article.

## Références

1. Fukushima N., Fukagata K., Kasagi N., Noguchi H., Tanimoto K., "Numerical and experimental study on turbulent thermal mixing in a T-junction flow", 6<sup>th</sup> ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, March 16-20,2003.
2. Hirota M., Asano H., Nakayama H., Asano T., Hirayama S., "Three-dimensional structure of turbulent flow in mixing T-junction", JSME international Journal, Series B, Vol 19, No 4, 2006.
3. Fransolet, P. Marchot, M. Crine, D. Toye, Caractérisation des écoulements en présence d'un agitateur rotor-stator et d'un fluide non newtonien en cuve agitée par vélocimétrie par images de particules, 10<sup>ème</sup> Congrès Francophone de Vélocimétrie Laser, 19-22 septembre 2006.
4. T.D Nguyen, S. Simoëns, M. El Hajem "Etude du mélange turbulent d'un fluide non-newtonien à travers une jonction en "T"" *Congrès Francophone de Techniques Laser, CFTL 2010, Vandoeuvre-lès-Nancy, 14 – 17 septembre, 2010.*
5. T.D Nguyen, S. Simoëns, M. El Hajem, « Turbulent mixing in a T junction with non-Newtonian fluid”, submitted Int. J. of Heat and Fluid Flow, 2011.
6. S. Simoëns et M. Ayrault, "Concentration flux measurements of a scalar quantity in turbulent flows”, Experiments in fluids, Vol. 16, n° 3-4, pp 273-281, 1994.
7. J.Y. Vinçont, S. Simoëns, M. Ayrault et J.M. Wallace "Passive scalar dispersion in a turbulent boundary layer from a line source at the wall and downstream of an obstacle " JFM, vol. 424 pp 1-41, 2000.