

# Transition vers la turbulence pour un fluide rhéofluidifiant en écoulement dans une conduite cylindrique

**R. DEVIENNE, A. LARUELLE, C. NOUAR, S. BEKER**

LEMTA, UMR 7563, CNRS-Université de Lorraine, 2 avenue de la Forêt de Haye,  
54500 Vandœuvre-lès-Nancy

## Résumé :

*La transition vers la turbulence en conduite cylindrique pour des fluides non-Newtoniens dont le caractère rhéofluidifiant est suffisamment marqué se caractérise par l'apparition d'un régime non linéaire asymétrique avant l'apparition des spots classiques de turbulence "puffs" [1,2,3]. Dans ce régime non linéaire asymétrique, les profils de vitesse axiale mesurés par LDA présentent une asymétrie croissante avec le nombre de Reynolds et avec la position axiale mesurée à partir de l'entrée. Cette asymétrie se caractérise par l'existence dans une section de la conduite d'une zone de survitesse et d'une zone de sous-vitesse. Dans la présente communication, nous présentons de nouveaux résultats expérimentaux sur la structure de l'écoulement obtenus par PIV 2D. L'analyse des profils de vitesse axiale mesurés à différents instants montre que cette asymétrie n'est pas stationnaire. Dans une section de la conduite, la position azimutale de la zone de survitesse évolue au cours du temps. Un post-traitement par décomposition en modes propres orthogonaux (POD) est développé pour mettre en évidence les caractéristiques énergétiques principales du régime non linéaire asymétrique.*

## Abstract :

*The transition to turbulence in a cylindrical pipe of non-Newtonian fluids for which the shear-thinning behavior is sufficiently strong is characterized by the appearance of a nonlinear asymmetric state before the observation of turbulent spots (puffs) [1,2,3]. In this nonlinear asymmetric regime, the axial velocity profiles measured with LDA exhibit an increasing asymmetry with increasing the Reynolds number and with increasing the axial position from the entrance. This asymmetry of the time-averaged axial velocity profiles is described in terms of low and fast streaks. In this communication, new experimental results obtained using 2D PIV are presented. The analysis of the axial velocity profiles at different times show that this asymmetry is not stationary. For a given axial location, the azimuthal position of the high/low h streaks evolve with time. A post-processing based on Proper Orthogonal Decomposition of eigen-modes in order to highlight the most energetic modes.*

**Mots clefs : fluides non-Newtoniens, transition turbulente, LDA, PIV, POD**

## 1. Introduction

La présente étude s'intéresse au problème de la transition vers la turbulence de fluides rhéofluidifiants à seuil de contrainte en canalisation cylindrique. Le comportement rhéologique du fluide est supposé être décrit par le modèle de Herschel-Bulkley. Les résultats expérimentaux obtenus par Escudier *et al.* [1],[2], [3], Peixinho *et al.* [4], Esmael et Nouar [5], Guzel *et al.* [6] montrent que le scénario de transition est complètement différent de celui observé pour un fluide Newtonien. Il se caractérise d'une part par l'apparition d'un régime non-linéaire asymétrique et par un retard (en termes de Reynolds) à l'apparition des bouffées de turbulence (puffs). Le nombre de Reynolds est défini avec la viscosité pariétale. Il convient de rappeler que l'écoulement laminaire d'un fluide Herschel-Bulkley est linéairement stable comme dans le cas Newtonien [7], [8]. Il n'existe donc pas de point de bifurcation à partir duquel, une analyse non linéaire peut être conduite. Une perturbation d'amplitude finie est donc nécessaire pour assurer la transition vers la turbulence. Une modélisation de la transition vers la turbulence a été récemment effectuée [9] en adoptant une approche basée sur le calcul d'ondes non linéaires. Dans cette approche, un forçage virtuel de l'équation de quantité de mouvement est imposé pour déclencher une bifurcation. Les ondes non linéaires solutions du problème seraient des précurseurs et supports des bouffées turbulentes. Moyennant, cette approche, il a été montré d'une part que la rhéofluidification retarde l'apparition des bouffées de turbulence et que la solution non linéaire avec un nombre d'onde azimutal  $m = 1$ , ne peut pas conduire à une bifurcations sous critique. Dans le régime non linéaire asymétrique, les profils de vitesse mesurés par LDA, moyennés dans le temps, présentent une asymétrie croissante le long de la conduite et avec le nombre de Reynolds ainsi qu'une augmentation significative du taux de fluctuation de la vitesse axiale. Dans les régimes laminaire et turbulent les profils de vitesse axiale sont parfaitement symétriques. L'analyse des résultats obtenus dans différents laboratoires indiquent que cette asymétrie ne résulte pas d'un artefact expérimental mais plutôt d'un phénomène physique lié au comportement rhéologique du fluide. Les travaux d'Escudier *et al.* [3] semblent indiquer que cette asymétrie est liée au caractère rhéofluidifiant. En effet des essais effectués avec des fluides faiblement rhéofluidifiants ne présentent aucune asymétrie dans les profils de vitesse. Récemment Wen *et al.* [10] ont proposé un autre point de vue sur l'asymétrie des profils de vitesse axiale, remettant en cause l'utilisation d'un modèle rhéologique purement visqueux. Des mesures par PIV 3D montrent globalement que pour une position axiale donnée, la position azimutale de la strie haute vitesse varie au cours du temps. Dans ce qui suit, nous proposons de compléter cet aperçu par des mesures systématiques moyennant la PIV 2D et la LDA.

## 2. Dispositif expérimental et techniques de mesure

La figure 1 présente les principaux éléments de la boucle expérimentale. La zone d'essais est constituée par des tronçons d'une canalisation horizontale de diamètre intérieur  $D=3\text{cm}$  et de longueur totale  $270 D$ . Ces parties sont réalisées en altuglas de façon à permettre le passage des faisceaux ou du plan laser. Il faut noter que, pour ce qui est de la L.D.A, l'ensemble du dispositif de mesure est mobile autour d'un axe horizontal coïncidant avec l'axe de la canalisation, la position du plan de mesure étant repéré par l'angle azimutal  $\theta$  et peut être déplacé dans le sens longitudinal (position repérée par coordonnée  $z$ ). Pour les mesures de vitesse axiale par LDA, on a utilisé Flow-Lite (Dantec) constitué d'une source laser Hélim-Néon de 10 m.W. W, émettant une lumière de longueur d'onde 632 n.m. La partie optique permet d'avoir un volume de mesure de  $651 \mu\text{m}$  et de longueur  $77 \mu\text{m}$ . Les mesures PIV sont réalisées avec un laser Nd-YAG qui émet une nappe laser de 1 mm d'épaisseur dans la longueur d'onde 532 nm avec une énergie de 120 mJ par impulsion. Les pulses durent 5 ns. Les séquences d'images sont enregistrées par une caméra 10 bits de résolution 1032x778 pixels à la fréquence de 20 Hz. Le temps entre deux doublets d'images est de 500 ms et le temps entre deux images d'un même

doublet est de 50  $\mu$ s. Pour la mise en œuvre de la PIV, un dispositif spécifique ayant la forme extérieure d'une boîte parallélépipédique peut être placée en divers points de la zone d'essais. Ce dispositif a pour objectif de minimiser les déformations de l'image observée, dues aux variations d'indice optique aux diverses interfaces solide-liquide. Il est alors possible d'obtenir une image rectangulaire (1024pixels x 1024pixels), l'axe de symétrie de l'image coïncidant avec l'axe de la canalisation. Pour raison de commodité, l'image observée se situe dans un plan diamétral et vertical. En bout de canalisation, deux prises de pression ont été installées, distantes de  $L=2$ m, elles alimentent un capteur de pression différentielle (Druck LPX 9481). L'écart de pression mesurée  $\Delta p$  permet la détermination de la contrainte pariétale  $\tau_p$ . Moyennant la connaissance des propriétés rhéologiques du fluide testé, cette contrainte permet de connaître le taux de cisaillement pariétal  $\dot{\gamma}_p$ , puis la viscosité apparente à la paroi  $\mu_p$ . Cette dernière donnée permet alors le calcul d'un nombre de Reynolds pariétal.

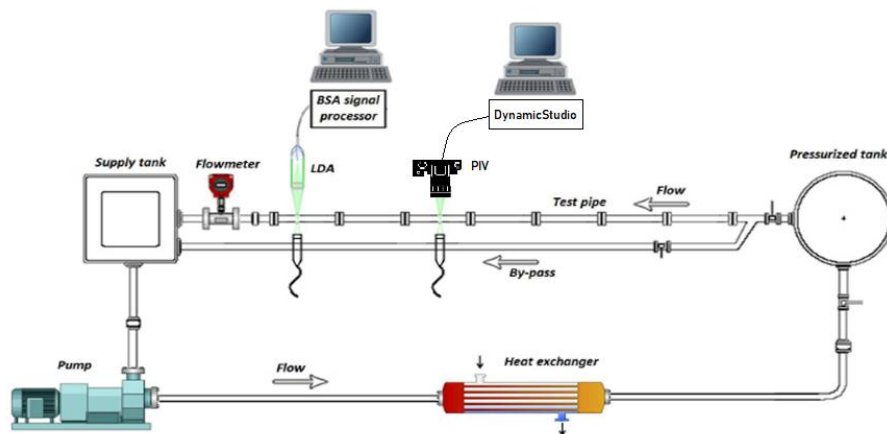


Figure 1 : Dispositif expérimental

Les fluides utilisés sont majoritairement des solutions de Carbopol 940, de concentration pondérale de l'ordre de 0.2%. Leurs caractéristiques rhéologiques sont déterminées à l'aide d'un rhéomètre rotatif AR2000 (TA Instrument), équipé d'une géométrie plan-cône (diamètre 6cm, angle d'ouverture  $1^{\circ}00'36''$ ). Les essais rhéologiques montrent que pour une large gamme de taux de cisaillement,  $1 \leq \dot{\gamma} \leq 3000 \text{ s}^{-1}$ , la variation  $\tau(\dot{\gamma})$  peut être interpolée par le modèle d'Herschel-Bulkley.  $\tau = \tau_s + k\dot{\gamma}^n$ .

### 3. Résultats et discussion

#### 3.1. Mesures LDA

Pour identifier la fin du régime laminaire et le début de la transition vers la turbulence, le taux de fluctuations de la vitesse axiale rms( $\hat{w}'$ ) est mesuré en fonction du nombre de Reynolds (défini avec la viscosité pariétale) à différentes positions radiales. Le résultat est donné par la figure 2. En régime laminaire, le rapport  $I_t = rms(\hat{w}')/\hat{W}_d$  où  $\hat{W}_d$  est la vitesse débitante reste pratiquement constant. A partir de  $Re = Re_{c1}$ , (pour le fluide utilisé  $Re_{c1} \approx 2000$ ), le régime laminaire cesse d'être un attracteur global et un nouvel état est choisi par le fluide. Dans ce nouvel état,  $I_t$  reste au même niveau qu'en laminaire dans une zone centrale où la viscosité est très élevée et augmente de manière significative avec  $Re$  au voisinage de la paroi. A partir de  $Re_{c2} \approx 4000$ ,  $I_t$  augmente fortement dans toute la section de la conduite, atteint un maximum, ensuite relaxe vers la valeur correspondante à un écoulement turbulent pleinement développé.

On distingue ainsi deux phases lors de la transition vers la turbulence. La première correspond à  $Re_{c1} \leq Re \leq Re_{c2}$  et la seconde à  $Re_{c2} \leq Re \leq Re(I_t = \max(I_t))$ . Il est important de noter que durant toute la première phase de transition, le coefficient de frottement s'écarte légèrement de la valeur

laminaire, ce qui signifie que le système est faiblement dissipatif. C'est dans la première phase que l'écoulement présente en moyenne dans le temps une asymétrie.

Pour obtenir une description tridimensionnelle de l'organisation de l'écoulement, des profils de vitesse axiale ont été mesurés à différentes positions axiales et à différentes positions azimutales. Pour quantifier l'asymétrie de l'écoulement, on définit un taux de dissymétrie par  $W_s(r, \theta) = [W(r, \theta) - (W(r, \theta) + W(r, \theta + \pi))/2]$ . La représentation des contours d'iso-valeurs de  $W_s(r, \theta, z)$  à différentes positions axiales est montrée par la figure 2. La zone rouge indique la région où l'écoulement du fluide est plus rapide que l'écoulement moyenné en azimuth. La zone bleue indique la région où l'écoulement est plus lent.

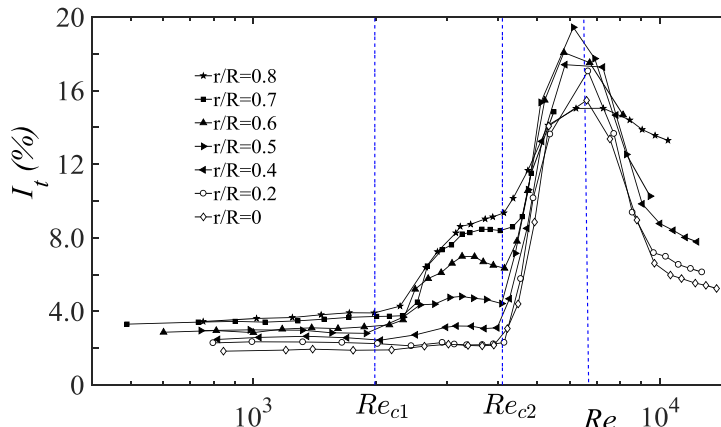


Figure 1 : Taux de fluctuations de la vitesse axiale en fonction du nombre de Reynolds

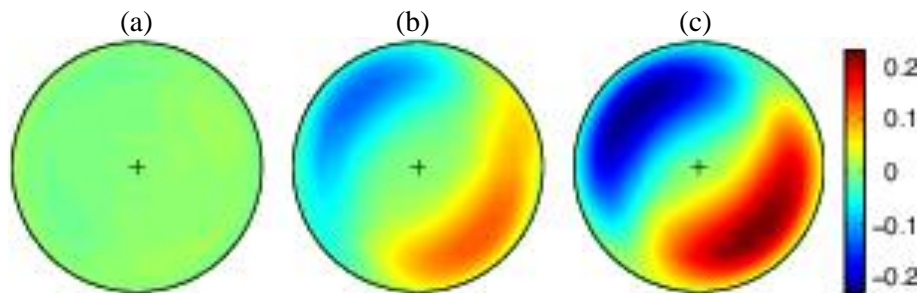


Figure 2 : Contours d'iso-valeurs de  $W_s$  à  $Re = 2420$  et à trois positions axiales : (a)  $\hat{z} = 20D$  ; (b)  $\hat{z} = 54D$  et (c)  $\hat{z} = 120D$

### 3.2. Champs de vitesse PIV

La figure 3 montre des profils de vitesse axiale instantanés mesurés à  $Re = 4200$  et à trois instants différents. La position du maximum de la vitesse axiale évolue au cours du temps. L'asymétrie décrite dans le paragraphe précédent n'est donc pas stationnaire. La position azimutale où l'écoulement du fluide est plus rapide varie au cours du temps, et décrit probablement toute la circonférence. Néanmoins, les analyses statistiques des fluctuations de la vitesse axiale (pdfs) montrent clairement que la zone où l'écoulement est plus rapide occupe préférentiellement (du point de vue temporel) un côté donné de la canalisation, ce qui explique la non-symétrie observée par LDA. Il est intéressant d'observer que le passage d'un spot de turbulence (puff) rend la distribution de la vitesse axiale plus uniforme (fig 3c).

Pour analyser la dynamique de l'écoulement, on applique une décomposition orthogonale en modes propres au champ de vitesse. On obtient ainsi les modes propres qui satisfont l'équation

$$W(r,t) = \sum_{k=1}^N a_k(t) \phi_k(r)$$

Le premier mode est très proche de la moyenne temporelle des profils de vitesse axiale. L'énergie associée à ce mode représente pratiquement 80% de l'énergie totale. Le deuxième mode représente 14% de l'énergie totale. IL est représenté par la figure 4 à deux instants différents. Il rend compte de l'évolution temporelle des profils de vitesse axiale.

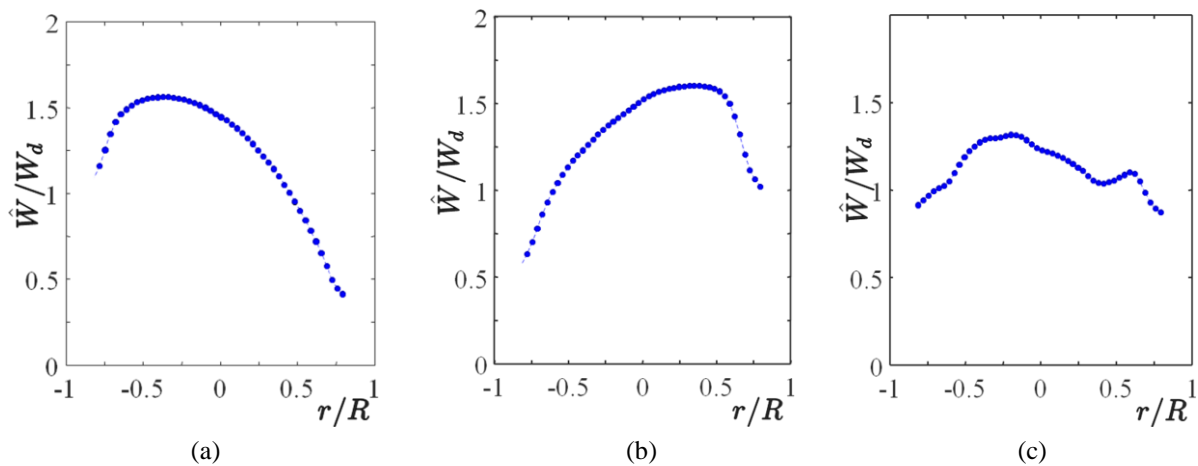


Figure 3 : Profils de vitesse axiale instantanés mesurés dans un plan vertical à  $Re = 4200$

(a)  $t = 3.6$  s ; (b)  $t = 3.8$  s ; (c)  $t = 3.9$  s

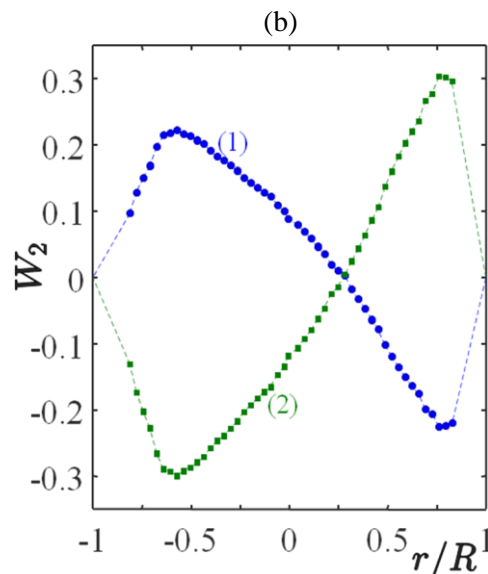


Figure 4 : Mode 2 des fluctuations de la vitesse à deux instants différents.

## 4. Conclusion

Dans la présente communication, de nouveaux résultats expérimentaux sont apportés sur l'asymétrie de l'écoulement observée dans la première phase de transition vers la turbulence. Les mesures de champs de vitesse par PIV montrent que cette asymétrie est instationnaire. Cependant, il semblerait que cette asymétrie a une orientation préférée où l'écoulement passe plus de temps ce qui explique l'asymétrie des profils de vitesse axiale observée par LDA. Le passage d'un spot de turbulence détruit

temporairement l'asymétrie de l'écoulement. Enfin, une analyse par POD, montre que le champ de vitesse axiale peut être décrit par trois modes au maximum.

## Références

- [1] M.P. Escudier and F. Presti. Pipe flow of thixotropic liquid. *J. non-Newtonian Fluid Mech.* 62, 291-306 (1996)
- [2] M.P. Escudier, R.J. Poole, F. Presti, C. Dales, C. Nouar, C. Desaubry, C. Graham and L. Pullum. Observations of asymmetrical flow behavior in transitional pipe flow of yield stress and other shear thinning liquids. *J. non-Newtonian Fluid Mech.*, 127, 143–155, 2005.
- [3] M.P. Escudier, S. Rosa and R. Poole. Asymmetry in transitional pipe flow of drag-reducing polymer solutions. *J. non-Newtonian Fluid Mech.* 161, 19-29 (2009).
- [4] J. Peixinho, C. Nouar, C. Desaubry, and B. Théron . Transitional and turbulent flow of yield stress fluid in a pipe. *J. non-Newtonian Fluid Mech.*, 128, 172–184, 2005.
- [5] A. Esmael, C.Nouar. Flow of a yield-stress fluid in a pipe: Evidence of a robust coherent structure, *Phys. Rev. E*,77,(2008)
- [6] B. Gügel, T.Burghela, I.A Frigaard and D. Martinez. Observation of a laminar-turbulent transition of a yield-stress fluid in Hagen-Poiseuille flow, *J; Fluid Mech.* 627, 97-128, (2009)
- [7] S.N. López-Carranza, M. Jenny and C. Nouar. Pipe flow of shear-thinning fluids. *Comptes Rendus Mécanique*, 340(8), 602-618 (2012)
- [8] H. Bentråd, A. Esmael, C. Nouar, A. Lefevre and N. Aït-Messaoudène. Energy growth in Hagen Poiseuille flow of Herschel-Bulkley fluids. *J. non-Newtonian Fluid Mech.* 241, 43-59 (2017)
- [9] E. Plaut, R. Nicolas and C. Nouar. Nonlinear waves with a threefold rotational symmetry in pie flow: influence of strongly shear-thinning rheology. *J. Fluid Mech.* 818, 595-622 (2017)
- [10] C.Wen, R. Poole, A. Willis and D. Dennis. Experimental evidence of a symmetry-breaking supercritical transition in a pipe flow of shear-thinning fluids, *Physical Review Fluids* 2,031901R (2017)