

Étude du comportement d'un fluide non-newtonien dans une conduite avec contraction brusque 4 : 1

Mohamed Mahfoud^{a,*}, Salah Benhadid^a, Michel Lebouché^b

^a *Laboratoire de mécanique des fluides théorique et appliquée (équipe de rhéologie), faculté de physique, B.P. N° 32, El Alia, Bab-Ezzouar 16111, Alger, Algérie*

^b *Laboratoire d'énergétique et de mécanique théorique et appliquée, URA CNRS 875, 2, avenue de la forêt de la Haye, 54504 Vandoeuvre-les-Nancy, France*

Reçu le 17 février 2004 ; accepté après révision le 13 mai 2008

Disponible sur Internet le 16 juin 2008

Présenté par Évariste Sanchez-Palencia

Résumé

Le but de l'étude est de contribuer à la connaissance des écoulements des fluides viscoélastiques dans une contraction souvent étudiée mais par simulation numérique. Un dispositif a été conçu pour une étude expérimentale de l'écoulement par vélocimétrie Laser à effet Doppler. La configuration considérée est un écoulement isotherme dans une conduite rectangulaire comportant une contraction brusque de rapport 4 : 1. Nous avons caractérisé l'écoulement isotherme à différentes valeurs du nombre de Reynolds et présenté des corrélations de la vitesse axiale. *Pour citer cet article : M. Mahfoud et al., C. R. Mecanique 336 (2008).*

© 2008 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Study of the behavior of non-Newtonian fluid in a duct with 4 : 1 abrupt contraction. The purpose of this study is to contribute to the knowledge of viscoelastic fluids flows in a contraction which are often studied numerically. A device has been conceived for an experimental study of the flow by Laser Doppler velocimetry. An isothermal flow through a rectangular duct including an 4 : 1 abrupt contraction has been considered. We have characterized the isothermal flow for different values of Reynolds number and correlations of the axial velocity are presented. *To cite this article : M. Mahfoud et al., C. R. Mecanique 336 (2008).*

© 2008 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Mécanique des fluides ; Contraction brusque ; Contraction plane ; Vélocimétrie Laser à effet Doppler

Keywords : Fluid mechanics; Abrupt contraction; Planar contraction; Laser Doppler Velocimetry

1. Introduction

Le dimensionnement des échangeurs de chaleur et des conduites de transport, utilisant les produits industriels et agroalimentaires viscoélastiques, nécessite une plus grande connaissance du comportement du fluide utilisé au passage

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : mohmahfoud@yahoo.fr (M. Mahfoud).

d'une singularité, en particulier la contraction brusque de la section. Les connaissances dont nous disposons sur les contractions brusques sont souvent d'origine numérique et à faibles nombres de Reynolds [1–3].

L'intérêt de cette étude expérimentale est de contribuer à la constitution d'une base de données sur la contraction 4 : 1. Cette dernière est très sollicitée pour ces caractéristiques dynamiques très accentuées. Dans cette étude, nous déterminons les profils des vitesses, en fonction du nombre de Reynolds pour un fluide newtonien (eau) pris comme référence et une solution aqueuse viscoélastique de polyacrylamide. Des profils de vitesse pour différentes valeurs du débit ont été relevés et tracés. Les courbes obtenues nous ont permis de présenter quelques corrélations très utiles pour la compréhension du phénomène de pertes de charge.

2. Dispositif expérimental

Le dispositif utilisé (Fig. 1) est une boucle hydraulique fermée avec un bac amont pressurisé et un bac aval tranquillisé. L'écoulement du fluide test de viscosité dynamique η est assuré par un groupe motopompe à vitesse variable et un échangeur de chaleur servant à imposer la température de travail. Le débit volumique Q_v et la température T de travail sont maintenus constants à chaque série de mesures. La veine de mesures de section rectangulaire $20 \times 200 \text{ mm}^2$, en polyméthylméthacrylate transparent (PMMA), a une longueur totale de 2000 mm. La contraction est située à 1200 mm de l'entrée et à 800 mm de la sortie [4]. Le rapport de contraction de la veine de mesures est de :

$$\frac{\text{demi-hauteur amont}}{\text{demi-hauteur aval}} = \frac{H}{h} = \frac{4h}{h} = \frac{100 \text{ mm}}{25 \text{ mm}} = 4 : 1 \quad (1)$$

Les nombre de Reynolds Re et de Weissenberg We sont définis par :

$$Re = \frac{\rho U_H H}{\eta} = \frac{\rho U_h h}{\eta} = \frac{\rho Q_v}{2e\eta} \quad \text{et} \quad We = \frac{\lambda U_h}{h} \quad (2)$$

avec $\eta = \eta(\dot{\gamma})$ pour la solution non-newtonienne et telle que $\dot{\gamma} = U_h/h = Q_v/(2eh^2)$ où U_H et U_h sont les vitesses débitantes en amont et en aval de la contraction λ et $\dot{\gamma}$ sont respectivement le temps de relaxation du fluide et le taux de cisaillement moyen.

La chaîne «vélocimétrie Laser à effet Doppler» utilisée est constituée d'une source Laser He/Ne de longueur d'onde égale à 632,8 nm et de puissance 10 mW en rétro-diffusion, d'un système d'acquisition des données brutes relié à un micro-ordinateur PC. Ce dernier permet l'analyse, le traitement et la présentation des résultats définitifs. Le fluide test non-newtonien est une solution aqueuse de polyacrylamide le Séparan AP-30 ($MN = 4 \times 10^6$). Nous avons opté pour cette solution pour sa stabilité et sa transparence pour les besoins de mesures avec la technique Laser. La caractérisation rhéologique de la solution aqueuse a été faite à l'aide d'un viscosimètre à cylindres coaxiaux (Low shear 40 de Contraves) avec : rayon cylindre intérieur / rayon cylindre extérieur = 3 mm / 3,25 mm.

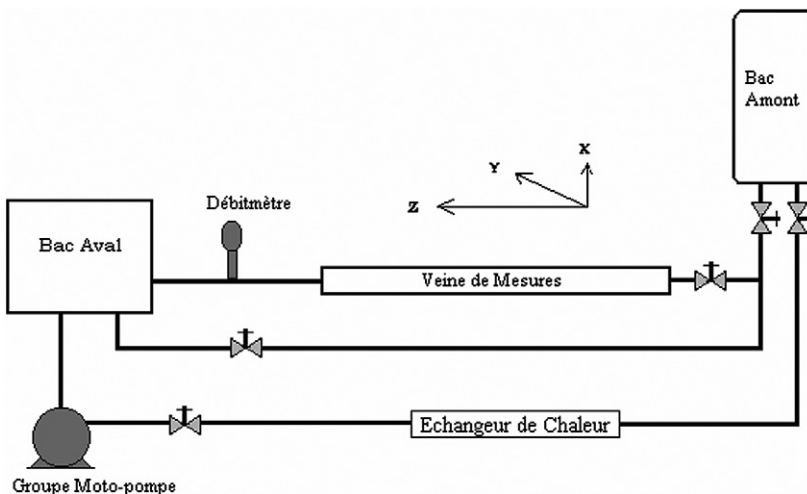


Fig. 1. Schéma du dispositif expérimental.

Fig. 1. Diagram of the experimental device.

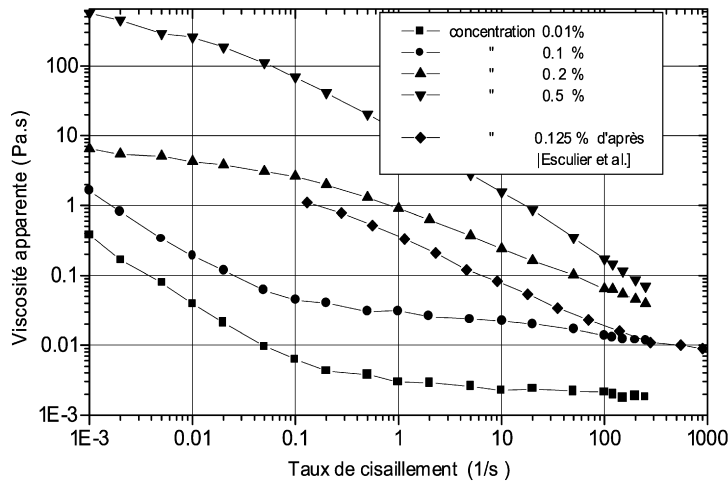


Fig. 2. Viscosité apparente de la solution polymérique à différentes concentrations.

Fig. 2. Apparent viscosity of the polymeric solution at different concentrations.

3. Résultats et discussion

3.1. Caractérisation rhéologique du fluide test non-newtonien

Les courbes de comportement de la solution viscoélastique à différentes concentrations en masse (Fig. 2) et à une température de 20 °C montrent que les deux paliers (η_0 et η_∞) peuvent apparaître ou disparaître de la fenêtre de mesures (domaine des valeurs) imposée par les caractéristiques techniques du viscosimètre, selon la concentration utilisée. La diminution de la concentration fait déplacer les courbes vers la gauche de la figure avec disparition du premier palier η_0 (viscosité à l'origine) de la fenêtre de mesures et son augmentation fait déplacer les courbes vers la droite de la figure avec disparition du second palier η_∞ (viscosité à l'infini). De part et d'autre du point d'inflexion de la courbe, le comportement de la solution est proche de celui d'un fluide pseudoplastique et les mesures peuvent être corrélées par une « loi de puissance ».

Pour tenir compte de l'allure de la courbe dans son ensemble, on peut corréler les mesures expérimentales par le modèle structurel de Cross, comme l'a fait Esculier [5] avec une solution aqueuse de polyacrylamide (Séparan AP273) et une concentration en masse de 0,125 % ou utiliser le modèle empirique proposé par Hamersma [6] pour une solution aqueuse de polyacrylamide (Séparan AP-30) à 0,5 % en masse et qui s'écrit :

$$\gamma = \frac{1}{\eta_\infty} [\tau - \tau_0(1 - e^{-a\tau})] \quad \text{avec } a = \frac{1}{\tau_0} \left(1 - \frac{\eta_\infty}{\eta_0}\right) \quad \text{et } \eta_\infty : \text{viscosité dynamique du solvant} \quad (3)$$

η_0 et η_∞ sont les viscosités à faible taux de cisaillement et à fort taux de cisaillement, τ est la contrainte de cisaillement, τ_0 paramètre.

Pour la suite des mesures, nous avons opté pour une concentration de 0,2 % en masse afin d'avoir des viscosités importantes aux taux de cisaillement imposés dans la veine de mesure, sans pour autant avoir des viscosités néfastes pour le dispositif expérimental à grands débits [7]. La corrélation (3) donne pour une concentration de 0,2 % en masse et à une température de 20 °C, les valeurs suivantes : $\eta_0 = 3230$ mPa.s, $\tau_0 = 370$ Pa et $\eta_\infty = 1,06$ mPa.s.

Les débits volumiques imposés dans la veine de mesures ($2 < Q_v < 50$ l/mn) donnent, d'après la relation (2), des valeurs moyennes du taux de cisaillement γ supérieures à 1 s^{-1} et par conséquent le comportement est pseudoplastique ou rhéofluidifiant. Ceci nous permet d'utiliser la « loi puissance » pour caractériser le comportement de la solution et dans ce cas on peut écrire :

$$\tau = k\gamma^n \quad \text{et} \quad \eta = \frac{\tau}{\gamma} = k\gamma^{n-1} \quad \text{et} \quad \eta = k\gamma^{n-1} = 0,954\gamma^{-0,562} \quad (4)$$

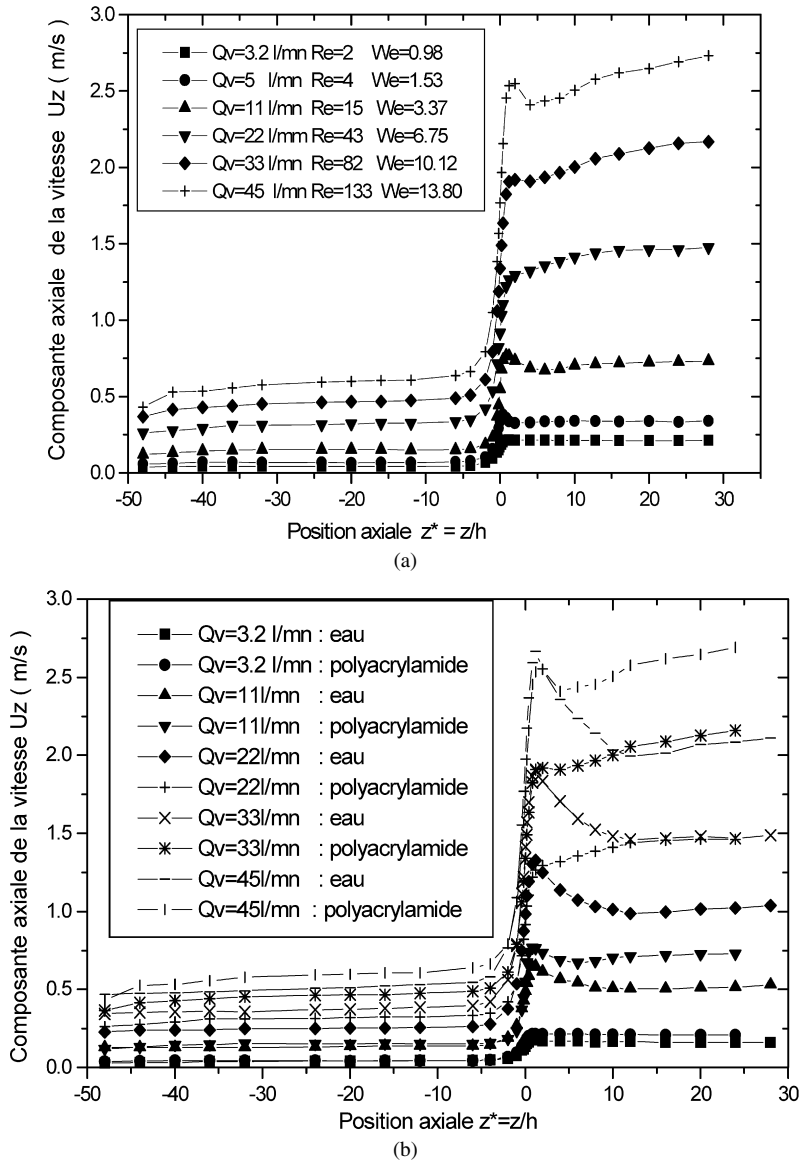


Fig. 3. Profils de la vitesse axiale U_z le long du plan central. (a) Solution non-newtonienne ; (b) Comparaison entre le fluide newtonien et le fluide non-newtonien.

Fig. 3. Profils of the axial velocity U_z along the centerplane. (a) Non-Newtonian solution; (b) Comparison between the Newtonian fluid and the non-Newtonian fluid.

3.2. Évolution axiale de l'écoulement

Afin de connaître le comportement de l'écoulement à l'amont et à l'aval de la contraction, nous avons suivi l'évolution de la composante axiale U_z sur l'axe principal le long de la veine (axe oz) pour différents débits ou nombres de Reynolds (Figs. 3(a) et 3(b)).

L'analyse de ces résultats montre que, sur une grande partie de la zone amont, la vitesse n'évolue pratiquement pas ; la zone d'influence de cette singularité commence à partir de $-10h$ en amont du plan de contraction. Sur la partie aval, la zone d'influence se décale vers l'aval. Ceci est d'autant plus lisible que le débit est fort. Le comportement de l'écoulement dans la partie aval à forts Re est complètement différent de celui à faibles Re (Fig. 3(a)). On note aussi

que l'augmentation du débit fait réagir qualitativement et quantitativement la contraction par un déplacement et une augmentation de l'amplitude du pic des vitesses vers la partie aval.

Le calcul du taux d'élongation dans le sens de l'axe principal (oz), défini par $\varepsilon = dU_z/dz$, donne un taux maximal au niveau du plan de la contraction. Une comparaison des valeurs maximales obtenues pour l'eau (fluide newtonien) et la solution polymérique (fluide viscoélastique) donnent pour deux valeurs extrêmes du débit les valeurs suivantes :

- Eau (newtonien) : à $Q_v = 3,2$ l/mn, $\varepsilon = 0,04$ et à $Q_v = 45$ l/mn, $\varepsilon = 0,42$
- Solution (non-newtonien) : à $Q_v = 3,2$ l/mn $\varepsilon = 0,05$ et à $Q_v = 45$ l/mn, $\varepsilon = 0,99$

L'analyse de ces valeurs montre une égalité entre les deux fluides aux faibles débits, due probablement à la prédominance de la propriété visqueuse sur la propriété élastique ; par contre, à forts débits la propriété élastique l'emporte et l'écart entre les valeurs devient assez important.

3.3. Évolution transversale de l'écoulement

Le tracé des profils de vitesse adimensionnelle (Figs. 4(a) et 4(b)) de la composante transversale montre des changements de profils en amont et en aval de la contraction brusque et qui s'expliquent par des changements de régime dans l'écoulement. Ces profils peuvent se mettre sous la forme :

$$U_{z'} = \frac{U_z}{U_{z_{\max}}} = 1 - (y')^n \quad \text{avec } y' = \frac{y}{4h} \text{ en amont et } y' = \frac{y}{h} = y^* \text{ en aval} \quad (5)$$

Sur la Fig. 4(a) (partie amont), les courbes de la composante axiale adimensionnelle de la vitesse $U_{z'}$ en fonction de la position transversale adimensionnelle y' montrent un profil très plat caractéristique des fluides pseudoplastique avec un changement de régime (laminaire – transitoire). Dans cette partie amont, il était difficile d'atteindre le régime turbulent avec les débits imposés. A faibles débits (régime – laminaire) les profils donnent une puissance n de l'ordre de 8.

Sur la Fig. 4(b) (partie aval) les courbes, représentant $U_{z'}$ en fonction de $y' = y^*$, montrent des profils moins plats que dans la partie amont (Fig. 4(a)) avec un changement de régime (laminaire – turbulent) en passant par le régime transitoire. Les profils, en régime laminaire, donnent cette fois-ci une valeur de n voisine de 6.

Les données disponibles, pour la comparaison, sont celles de Natarajan et al. [8] établies par une résolution de l'équation du mouvement d'un fluide newtonien dans une conduite de section rectangulaire de longueur a et de largeur b . Ils ont résolu le problème par la méthode des éléments finis et ont proposé la forme suivante :

$$U_{z'} = \left[1 - \left(\frac{x}{b} \right)^m \right] \left[1 - \left(\frac{y}{a} \right)^n \right] \quad \text{avec } n = 1,7 + 0,5 \left(\frac{b}{a} \right)^{-0,25} \quad (6)$$

et

$$m = \begin{cases} 2 & \text{pour } E = \frac{b}{a} \leq \frac{1}{3} \\ 2 + \left(\frac{b}{a} - \frac{1}{3} \right) & \text{pour } E = \frac{b}{a} \geq \frac{1}{3} \end{cases}$$

Dans le plan médian ($yo z$) $x = 0$ et cette relation se réduit à :

$$U_{z'} = \frac{U_z}{U_{z_{\max}}} = 1 - \left(\frac{y}{a} \right)^n = 1 - (y')^n \quad (7)$$

4. Conclusion

La vélocimétrie laser à effet Doppler a très bien caractérisé l'écoulement dans une contraction brusque 4 : 1. A l'amont de la contraction et sur une grande partie les profils n'évoluent pas. L'effet de la contraction ne commence à se faire sentir qu'à partir de $z^* = -10h$. A l'aval, le comportement de l'écoulement de la solution viscoélastique est différent de celui d'un fluide newtonien. Proche de la contraction, la composante longitudinale (axiale) U_z évolue beaucoup avec un pic très marqué juste après le plan de contraction et qui se traduit par un taux d'élongation très important pour le fluide viscoélastique.

Le comportement différent de la solution viscoélastique s'est traduit par des profils de vitesse très différents de ceux d'un fluide newtonien avec un aplatissement plus accentué de ces profils à l'amont de la contraction. Le passage

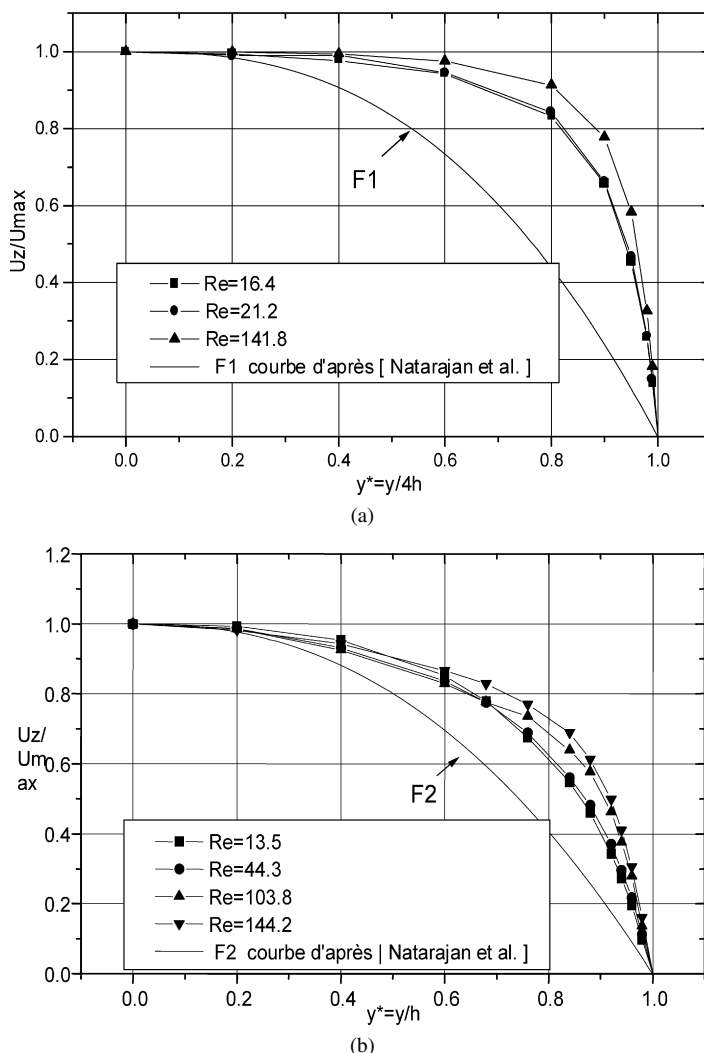


Fig. 4. Profils de la vitesse axiale adimensionnelle ; (a) en amont ; (b) en aval.

Fig. 4. Profils of the dimensionless axial velocity; (a) upstream; (b) downstream.

vers le régime turbulent, dans la partie aval, fait encore aplatis ces profils de vitesse qui se traduisent forcément par des pertes de charge plus importantes.

Références

- [1] M. Fortin, D. Esselaoui, A finite element procedure for viscoelastic flows, *Int. J. Numer. Methods Fluids* 7 (1987) 1035–1052.
- [2] L.M. Quinzani, R.C. Armstrong, R.A. Brown, Birefringence and Laser Doppler Velocimetry (LDV) studies of viscoelastic flow through a planar contraction, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 52 (1994) 1–36.
- [3] B. Purnode, M.J. Crochet, Fows of polymer solutions through contractions, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 65 (1996) 269–289.
- [4] M. Mahfoud, S. Benhadid, Etude de l'écoulement dans une contraction brusque, *Rhéologie* 1 (2002) 26–34.
- [5] M.P. Esculier, S. Smith, Fully developed turbulent flow of non-Newtonian liquids, in: *10th Int. Symp. on Application of Laser Technics to Fluids Mechanics*, IST-Lisbon, 2000.
- [6] P.J. Hamersma, J. Ellenberger, J.H.M. Fortuin, A three-parameter model describing the behaviour of a viscoelastic liquid in a tangential annular flow, *Rheologica Acta* 21 (6) (1982) 705–712.
- [7] M. Mahfoud, S. Benhadid, Comportement d'un polymère dans une singularité, *Congrès Matériaux*, 2002, Tours.
- [8] N.M. Natarajan, P. Lakshmanan, Laminar flow in rectangular ducts: Prediction of velocity profiles and friction factors, *Indian J. Technol.* 10 (1972) 435–438.