

Écoulement dans un tube faiblement divergent : transition laminaire-turbulent

Jorge Peixinho

Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, CNRS UMR 6294 et Normandie Université, 76600 Le Havre
jorge.peixinho@univ-lehavre.fr

Résumé. L'écoulement dans un tube parfaitement cylindrique et la bifurcations entre les régimes d'écoulement laminaire et turbulent sont sous-critiques. C'est à dire que la transition du régime laminaire au régime turbulent se manifeste par l'apparition d'une intermittence sous forme de bouffées ou "puffs" turbulents localisés qui se propagent le long de la conduite. Autrement dit, l'écoulement de Poiseuille cylindrique est linéairement stable pour tout nombre de Reynolds. D'un autre coté, la transition des écoulements dans des tubes avec des élargissements brusques est caractérisée par l'apparition d'une recirculation secondaire super-critique. Lorsque le débit augmente, l'intensité et la taille de cette recirculation augmentent. Pour des débits plus forts, la recirculation devient dissymétrique et il se forme une bouffée turbulente localisée qui ne se propage pas. Cette étude présente des résultats expérimentaux et numériques pour les écoulements dans des tubes faiblement divergent afin de faire le lien entre des résultats récents pour les tubes et les élargissements brusques. En particulier, on quantifiera les conditions d'existence de la recirculation et les conditions de formation d'une bouffée turbulente.

Abstract. The flow in a straight cylindrical pipe and its laminar-turbulent bifurcation are sub-critical. That is to say the transition from laminar to turbulent flow takes place through the appearance of turbulent patches or turbulent puffs which propagate along the pipe. In other words, the cylindrical Poiseuille flow is linearly stable for all Reynolds number. On the other side, the transition in sudden expansion circular pipe flow is characterized by the appearance of a secondary super-critical recirculation cells. When the flow rate increases, the flow intensity and the size of this recirculation increase. For larger flow rates, the recirculation becomes asymmetric and forms a localized turbulent puff which stays localized. This study presents experimental and numerical results for flows in slowly diverging tubes in order to investigate the link between recent results in pipes and in sudden expansions. Specifically, the conditions for the existence of the recirculation and for puff formation will be quantified. The findings reported here indicate the transition scenario for a slowly diverging pipe is similar to that observed in sudden expansions.

1 Introduction

L'écoulement dans un tube faiblement divergent (c'est-à-dire un tube cylindrique dont le diamètre augmente faiblement le long de l'axe de l'écoulement), tel que celui représenté dans la figure 1(a), n'est pas suffisamment documenté. Cet écoulement est observé dans de nombreuses applications, par exemple, dans le système circulatoire sanguin [1] ou encore lorsque l'on utilise des pipettes. En effet, en mode prélèvement, le liquide, généralement peu visqueux, s'écoule le long de la pointe de la pipette dans un tube faiblement divergent. Le nombre de Reynolds, Re , basé sur le petit diamètre ou le diamètre de l'entrée, est de l'ordre de quelques centaines. $Re = Ud/\nu$ où U est la vitesse débitante, d est le diamètre d'entrée du tube et ν la viscosité cinématique du fluide. Il s'agit d'une turbulence à nombre de Reynolds modéré.

Le problème bidimensionnel de la stabilité de l'écoulement entre deux parois planes qui se coupent avec un angle, α , en un point source est appelé le problème de Jeffery-Hamel. Ce problème a été étudié théoriquement et numériquement. Des bifurcations, qui indiquent un ensemble de solutions avec des alignements de tourbillons le long de l'axe de l'écoulement, ont été trouvées [2,3,4]. D'autres travaux ont traité le cas de l'écoulement dans un élargissement brusque (avec des coins à 90°) et il a été montré que l'écoulement devient dissymétrique à partir de $Re = 80$ [5]. Dans le cas de tubes de section circulaires et avec une expansion brusque 1 : 2, il apparaît une bifurcation super-critique autour de $Re = 1000$

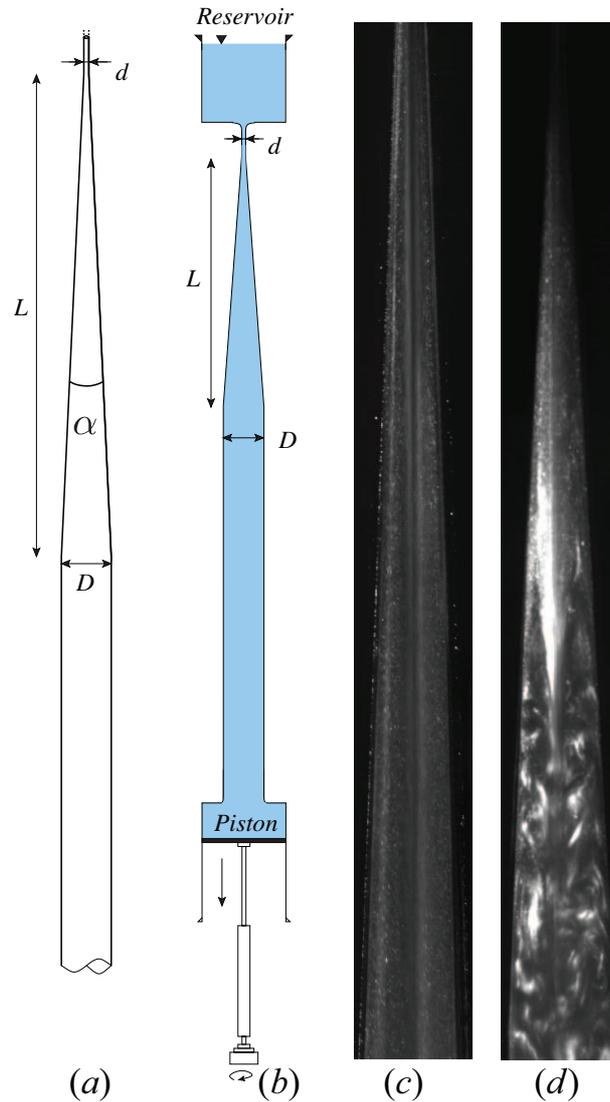


Figure 1. Schéma du problème (a), schéma du dispositif expérimental dessiné à l'échelle (b), visualisation de l'écoulement laminaire pour $Re = 150$ dans un tube de 4° (c) et visualisation d'une bouffée turbulente localisée pour $Re = 1100$ dans un tube de 6° (d). L'écoulement est du haut vers le bas.

[6,7,8,9] à partir duquel la recirculation devient dissymétrique et évolue dans le temps. Pour des nombres de Reynolds plus élevés, des bouffées turbulentes sont observées.

L'analyse de stabilité linéaire de l'écoulement dans un tube divergent a été étudiée par Sahu et Govindarajan [10]. L'écoulement est instable à partir de $Re = 150$ pour un tube de 3° . Les tubes considérés ont une longueur de divergent $L/d = 120$ et un rapport de diamètre $D/d \approx 7,3$ où D est le diamètre dans la section aval du divergent. D'un autre côté, des simulations numériques indiquent la séparation de l'écoulement à $Re = 2000$ [11]. Le but de cette étude est de fournir des données quantitatives afin de clarifier cette transition. Dans cette étude, des expériences de visualisation sont décrites. La dimension des recirculations et leurs temps de vie sont étudiés à l'aide d'un protocole de relaminarisation.

2 Dispositif expérimental

Un schéma du dispositif expérimental est fourni dans la figure 1(b). Il comprend un réservoir, un ensemble de tubes verticaux et un piston. Le débit est contrôlé à l'aide d'un pousse seringue électrique et des seringues en verre de 100 ml. Le dispositif tire le fluide avec un flux massique constant le long du tube. Deux divergents en acrylique avec $\alpha = 4^\circ$ (ou $\pi/30$ rad) et 6° (ou $\pi/45$ rad) ont été utilisés. Le tube de 4° a un diamètre d'entrée $d = 2,14 \pm 0,1$ mm et un diamètre de sortie $D = 21,4 \pm 0,1$ mm sur une longueur $L = 275,8 \pm 0,1$ mm. Le tube de 6° a une constriction en amont de la section divergente. Le diamètre d'entrée est $d = 3 \pm 0,1$ mm et le diamètre de sortie est $D = 21,4 \pm 0,2$ mm sur $L = 178,1 \pm 0,1$ mm. En aval du divergent, la sortie est prolongée sur 270 mm avec un tuyau en acrylique de diamètre constant. Les autres paramètres du problème sont le rapport des diamètres : $E = D/d$ entre les diamètres de sortie et d'entrée et la longueur non-dimensionnelle de la section divergente : $\beta = L/d$. Pour les tubes de 4° et 6° , $(E, \beta) = (10, 29)$ et $(7, 59)$, respectivement. Les visualisations de l'écoulement sont réalisées l'aide de Mearlmaid dilué dans l'eau déminéralisée et d'une nappe de lumière verticale. L'observation ont été faites dans la direction orthogonale à l'écoulement en utilisant une caméra numérique (MotionPro). Des exemples de visualisation de l'écoulement sont présentés Figs 1c et 1d.

3 Résultats et discussion

Les résultats consistent en l'analyse de photographies de visualisations d'écoulements. Pour de faibles débits, toutes les particules de fluides se déplacent dans le sens de l'écoulement. On pense alors à un écoulement laminaire type Poiseuille dont l'amplitude ou la vitesse maximale diminue fortement au fur et à mesure que l'on se déplace le long de la section divergente. Lorsque l'on augmente le débit, une recirculation, qui a une forme annulaire et étendue le long de l'axe de l'écoulement, apparaît. En observant le point de décollement de couche limite, des estimations quantitatives de la taille de la recirculation peuvent être obtenues. En résumé, aucune recirculation n'est observée pour $Re < 500$ dans le divergent de 4° et pour $Re < 700$ dans le divergent de 6° .

Avec une nouvelle augmentation du débit, la recirculation peut, dans certain cas, donner naissance à des bouffées turbulentes comme celle représentée Fig. 1d. Ces taches localisées turbulentes ont certaines similitudes avec les puffs turbulents observés dans les conduites rectilignes. Par exemple, elles ont des longueurs précises pour un Re donné et une onde en déclin à l'avant. Ces taches turbulentes sont localisés et dépendent de perturbations ou imperfections du système.

Une deuxième série de résultats concernent des expériences de relaminarisation. En pratique, on établit un écoulement à fort nombre de Reynolds, puis on diminue le débit afin de relaminariser la bouffée turbulente. Les temps de relaminarisation sont mesurés et utilisés pour construire les diagrammes décrivant la transition dans des tubes divergents. En résumé, le domaine sous-critique pour l'apparition de taches turbulents est de $Re = 720$ à 860 dans le divergent de 4° et entre $Re = 800$ et 1000 dans le tube de 6° . Au cours de la relaminarisation d'une tache turbulente, un jet de liquide passe au travers de la tache turbulente. Le jet de liquide ondule et des oscillations similaires de jet liquide dans une section divergente ont été observées dans des expériences en microfluidiques [12].

4 Conclusion

Cet article a présenté une étude sur l'écoulement dans des tubes faiblement divergents de 4 et 6° . A faible débit, l'écoulement est de type Poiseuille avec une amplitude diminuant le long de la section divergente. Pour des débits plus importants, une recirculation laminaire est observée. En augmentant encore le débit, la recirculation devient instable et forme une tache turbulente. Le caractère sub-critique est quantifié à l'aide d'expériences de relaminarisation. En résumé, le diagramme de bifurcation est représenté Fig. 2. Enfin, il est suggéré que cette géométrie est intéressante afin d'étudier en détail les taches de turbulence [13]. En effet, l'étude des propriétés de la turbulence est généralement complexe à cause de sa nature advective. Ici, les taches turbulentes sont localisées et la mesure des propriétés statistiques pour différentes Re sera probablement plus facile à mettre en œuvre.

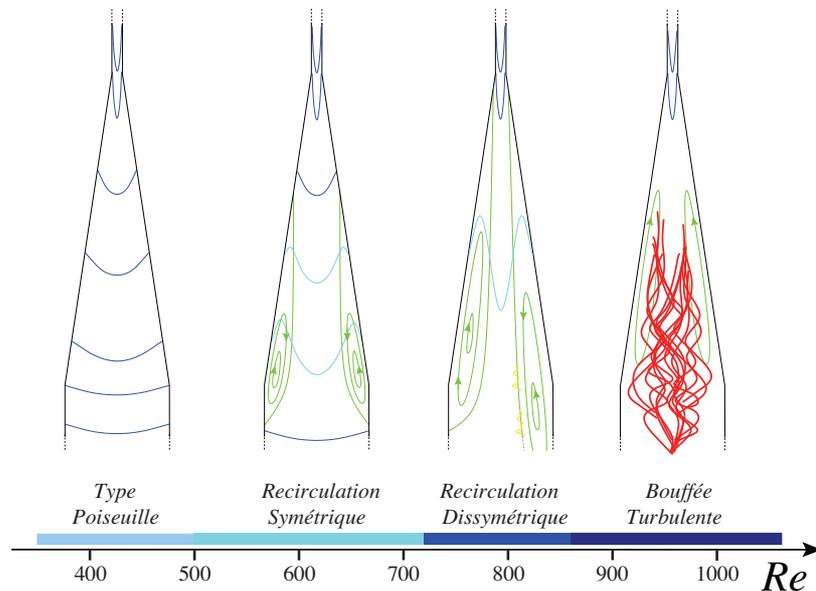


Figure 2. Diagramme de stabilité décrivant les différentes structures d'écoulements le long d'un tube faiblement divergent de 4° , en fonction du nombre de Reynolds, Re . Dans les schémas, les lignes bleues représentent les profils de vitesse et les lignes vertes représentent des lignes de courant. L'écoulement est du haut vers le bas.

Références

1. S. J. SHERWIN & H. M. BLACKBURN, Three-dimensional instabilities and transition of steady and pulsatile axisymmetric stenotic flows, *Journal of Fluid Mechanics* **333** 297-327 (2005)
2. M. HAMADICHE, J. SCOTT & D. JEANDEL, Temporal stability of Jeffery-Hamel flow, *Journal of Fluid Mechanics* **268** 71-88 (1994)
3. O. R. TUTTY, Nonlinear development of flow in channels with non-parallel walls, *Journal of Fluid Mechanics* **326** 265-284 (1996)
4. R. R. KERSWELL, O. R. TUTTY & P. G. DRAZIN, Steady nonlinear waves in diverging channel flow, *Journal of Fluid Mechanics* **501** 231-250 (2004)
5. R. M. FEARN, T. MULLIN & K. A. CLIFFE, Nonlinear flow phenomena in a symmetric sudden expansion, *Journal of Fluid Mechanics* **221** 595-608 (1990)
6. T. MULLIN, J. R. T. SEDDON, M. D. MANTLE & A. J. SEDERMAN, Bifurcation phenomena in the flow through a sudden expansion in a circular pipe, *Physics of Fluids* **21** 014110 (2009)
7. C. D. CANTWELL, D. BARKLEY & H. M. BLACKBURN, Transient growth analysis of flow through a sudden expansion in a circular pipe, *Physics of Fluids*, **22**, 034101 (2010)
8. E. SANMIGUEL-ROJAS, C. DEL PINO & C. GUTIÉRREZ-MONTEZ, Global mode analysis of a pipe flow through a 1 : 2 axisymmetric sudden expansion, *Physics of Fluids*, **22**, 071702 (2010)
9. E. SANMIGUEL-ROJAS & T. MULLIN, Finite-amplitude solutions in the flow through a sudden expansion in a circular pipe, *Journal of Fluid Mechanics*, **691** 201-213 (2012)
10. K. C. SAHU & R. GOVINDARAJAN, Stability of flow through a slowly diverging pipe, *Journal of Fluid Mechanics*, **531** 325-334 (2005)
11. E. M. SPARROW, J. P. ABRAHAM & W. J. MINKOWYCZ, Flow separation in a diverging conical flow : Effect of Reynolds number and divergence angle, *Int. Journal of Heat Mass and Transfer*, **52** 3079-3083 (2009)
12. T. CUBAUD & T. G. MASON, Folding of viscous threads in diverging microchannels, *Physical Review Letters*, **96** 114501 (2006)
13. P. MANNEVILLE, *Instabilités, chaos et turbulence* Ed. Ecole Polytechnique (2004)