

Sujet de thèse

Étude expérimentale des écoulements secondaires de fluides viscoélastiques dans un canal non-circulaire

Laboratoire : Centre d'Énergétique et de Thermique de Lyon (CETHIL UMR 5008) – Thème Fluides, Polymères et Composites. <https://cethil.insa-lyon.fr/fr>

Adresse : Campus de La Doua, Bât Carnot, 5 Promenade Jeanne Barret, 69621 Villeurbanne Cedex

Date de début : Septembre 2026

Financement : Contrat doctoral ministériel conditionné à la réussite au concours de l'Ecole Doctorale MEGA

Contexte et objectif : L'étude des écoulements de fluides viscoélastiques présente un grand intérêt pour la compréhension des phénomènes fondamentaux rencontrés dans l'industrie de transformation des polymères, notamment dans les procédés d'injection et les filières d'extrusion. Ces fluides possèdent à la fois des propriétés visqueuses et élastiques, qui se traduisent notamment par des effets de mémoire associés à un temps de relaxation, ainsi que par un comportement rhéofluidifiant caractérisé par une diminution de la viscosité lorsque la contrainte augmente. Une signature caractéristique du comportement viscoélastique est l'apparition d'écoulements secondaires dans un canal de section non circulaire (voir Figure 1). Ces écoulements résultent de l'existence d'une seconde différence de contraintes normales non nulle [2], issue du couplage entre l'élasticité du fluide et l'asymétrie géométrique du canal. Bien que leur vitesse ne représente qu'une très faible fraction de la vitesse axiale (moins de 1 %), ils modifient significativement la structure de l'écoulement principal et favorisent ainsi les transferts de masse et de chaleur [3, 4].

Jusqu'à présent, ces phénomènes ont été principalement étudiés à l'aide d'approches analytiques et numériques. La plupart de ces travaux se limitent à des fluides faiblement élastiques, en raison de difficultés de convergence rencontrées lors de la simulation de fluides à forte élasticité [5]. De plus, les études expérimentales demeurent extrêmement rares, en raison des difficultés de mesure liées aux fortes disparités de vitesse au sein de l'écoulement.

Afin de dépasser ces limitations numériques et expérimentales, des efforts ont été engagés au sein du thème Fluides, Polymères et Composites. Des outils numériques ont ainsi été développés, permettant de simuler des écoulements de fluides fortement élastiques [6, 7]. Néanmoins, une étude expérimentale reste encore à mener afin de valider les modèles développés et d'approfondir la compréhension des mécanismes à l'origine de la génération des écoulements secondaires.

Dans ce contexte, **l'objectif de cette thèse est de mener une analyse expérimentale les écoulements secondaires d'un fluide viscoélastique circulant dans un canal de section rectangulaire**. Plus précisément, le travail de la thèse proposée visera à identifier les conditions d'apparition des écoulements secondaires, à caractériser les mécanismes à l'origine de leur formation et à analyser leur évolution spatio-temporelle.

Méthode de travail :

Pour atteindre l'objectif, nous proposons de mettre en place un banc expérimental destiné à caractériser les écoulements secondaires dans un canal de section rectangulaire. Le dispositif expérimental, en cours de développement au sein du CETHIL, comprend un canal rectangulaire de 4 m de long, de section 3 cm × 4,5 cm (voir Figure 2), dans lequel le fluide circule à débit et température contrôlés. La longueur du canal a été choisie de manière à favoriser le développement longitudinal des structures secondaires.

Des fluides modèles envisagés comprendront des fluides purement rhéofluidifiants, des fluides purement élastiques ainsi que des fluides combinant élasticité et rhéofluidification. En faisant varier le débit et les propriétés rhéologiques des fluides, il sera possible d'explorer l'influence de l'inertie et de l'élasticité, caractérisées respectivement par les nombres de Reynolds (Re) et de Weissenberg (Wi), tout en restant dans un régime laminaire.

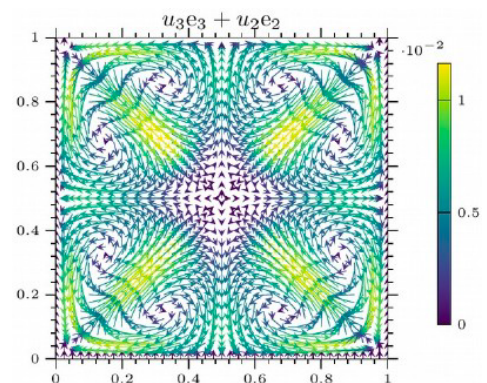


Figure 1 : Simulation numérique 2D des écoulements secondaires. Extrait de la thèse de F.Hagani [7].

Une caractérisation rhéologique des fluides sera menée dans un premier temps afin d'analyser ensuite l'écoulement selon le type de fluide. La caractérisation de l'écoulement reposera sur des mesures à différentes échelles spatiales permettant de capturer à la fois les vitesses axiales élevées et les faibles mouvements transverses, au centre du canal et à proximité des parois. Comme illustre la figure 2, plusieurs techniques optiques de mesure seront développées et mises en œuvre : la vélocimétrie laser Doppler bidimensionnelle (LDV 2D), la vélocimétrie par images de particules (PIV), la vélocimétrie par suivi de particules (PTV), ainsi que la fluorescence induite par laser planaire (PLIF) afin d'étudier l'impact des structures secondaires sur les transferts de masse et de chaleur (Figure 2).

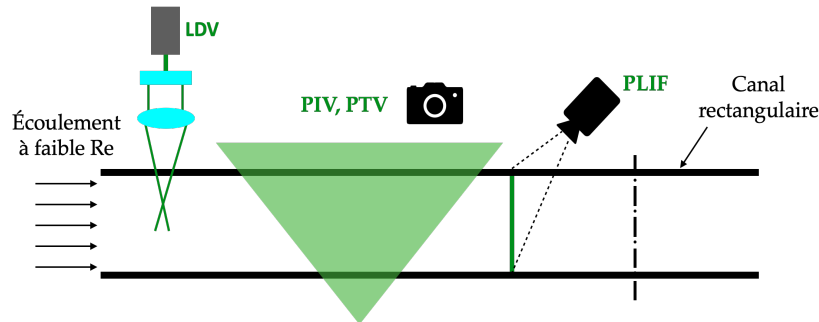


Figure 2 : Dispositifs de mesure envisagés pour l'analyse des écoulements secondaires.

Ce dispositif constituera un benchmark expérimental de référence pour la validation des approches numériques développées dans ce domaine. Il proposera également des méthodes expérimentales d'analyse des écoulements secondaires, permettant d'approfondir la compréhension des phénomènes à l'origine de leur formation dans les canaux non circulaires.

Profil recherché :

Le/la candidat.e est actuellement en deuxième année de master (ou équivalent) en mécanique des fluides ou en rhéologie et manifeste un goût prononcé pour le travail expérimental.

Le/la candidat.e devra se présenter au concours de l'École Doctorale MEGA en juin 2026. Le démarrage de la thèse est conditionné à la réussite à ce concours.

Les candidat.e.s sont invité.e.s à envoyer un CV, une lettre de motivation et les relevés de notes des deux années de Master à :

- Eliane Younes - MCF INSA Lyon (eliane.younes@insa-lyon.fr),
- Shihe Xin - PR INSA Lyon (shihe.xin@insa-lyon.fr),
- Hervé Pabiou - CR CNRS (herve.pabiou@insa-lyon.fr),
- M'hamed Boutaous - PR INSA Lyon (mhamed.boutaous@insa-lyon.fr).

Références :

- [1] S.S. Datta et al., Perspectives on viscoelastic flow instabilities and elastic turbulence, *Phys. Rev. Fluids*, 7, 080701, 2022.
- [2] D. R. Oliver et al., Laminar-flow non-newtonian heat transfer in flattened tubes, *Can. J. Chem. Eng.*, 49, 236, 1971.
- [3] J.P. Hartnett et al., Heat transfer to a viscoelastic fluid in laminar flow through a rectangular channel, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 28, 1147, 1985.
- [4] M.F. Letelier, D. A. Siginer, Secondary flows in tubes of arbitrary shape, *Rheology Series*, 8, 179, 1999.
- [5] R. Keunings, On the high Weissenberg number problem, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 20, 209, 1986.
- [6] X. Zheng et al., Pattern selection in Rayleigh-Bénard convection with nonlinear viscoelastic fluids, *Phys. Rev. Fluids*, 7, 023301, 2022.
- [7] Hagani F., Simulation numérique du transfert convectif dans un écoulement viscoélastique. *INSA Lyon, PhD*, 2021.

PhD topic

Experimental study of secondary flows of viscoelastic fluids in a non-circular channel

Laboratory: Centre for Energy and Thermal Sciences of Lyon (CETHIL UMR 5008) – Theme Fluids, Polymers et Composites. <https://cethil.insa-lyon.fr/fr>

Address: La Doua Campus, Carnot Building, 5 Promenade Jeanne Barret, 69621 Villeurbanne Cedex, France

Start date: September 2026

Funding: Ministerial doctoral contract, subject to successful completion of the MEGA Doctoral School selection process

Context et objective: The study of viscoelastic fluid flow is of great interest for understanding the fundamental phenomena encountered in the polymer processing industry, particularly in injection and extrusion processes. These fluids exhibit both viscous and elastic properties, characterized by memory effects associated with a relaxation time, as well as shear-thinning behavior, corresponding to a decrease in viscosity with increasing stress. A characteristic feature of viscoelastic behavior is the appearance of secondary flows in channels with non-circular cross-sections (see Figure 1). These flows arise from a non-zero second normal stress difference [2], resulting from the coupling between fluid elasticity and channel geometric asymmetry. Although their velocity represents only a small fraction of the axial velocity (typically less than 1%), they significantly modify the structure of the main flow and thereby enhance mass and heat transfer [3,4].

To date, these phenomena have been studied primarily through analytical and numerical approaches. Most of these studies are limited to weakly elastic fluids, due to convergence difficulties encountered when simulating highly elastic fluids [5]. Furthermore, experimental studies remain extremely rare due to measurement challenges associated with the large velocity disparities within the flow.

To overcome these numerical and experimental limitations, efforts have been undertaken within the Fluids, Polymers, and Composites research theme. Numerical tools have been developed to simulate highly elastic fluid flows [6, 7]. Nevertheless, an experimental study still needs to be conducted to validate the developed models and deepen our understanding of the mechanisms underlying the generation of secondary flows.

In this context, **the objective of this thesis is to conduct an experimental analysis of secondary flows in a viscoelastic fluid flowing through a rectangular channel.** More specifically, this thesis will aim to identify the conditions under which secondary flows occur, characterize the mechanisms underlying their formation, and analyze their spatiotemporal evolution.

Methodology:

To achieve this objective, we propose to develop an experimental setup designed to characterize secondary flows in a rectangular channel. The setup, currently under development at CETHIL, consists of a 4 m-long rectangular channel with a cross-section of 3 cm × 4.5 cm (see Figure 2), in which the fluid flows under controlled flow rate and temperature conditions. The channel length was chosen to promote the longitudinal development of secondary structures.

The model fluids considered will include purely shear-thinning fluids, purely elastic fluids, and fluids combining elasticity and shear-thinning behavior. By varying the flow rate and the rheological properties of the fluids, it will be possible to investigate the influence of inertia and elasticity, characterized by the Reynolds (Re) and Weissenberg (Wi) numbers, while remaining in the laminar regime.

A rheological characterization of the fluids will first be performed to analyze the flow depending on the fluid type. Flow characterization will rely on measurements at different spatial scales, enabling the capture of both high axial velocities and small transverse motions, at the center of the channel and near the walls. As illustrated in Figure 2, several optical measurement techniques will be developed and implemented, including two-dimensional laser Doppler velocimetry (2D LDV), particle image velocimetry (PIV), particle tracking velocimetry

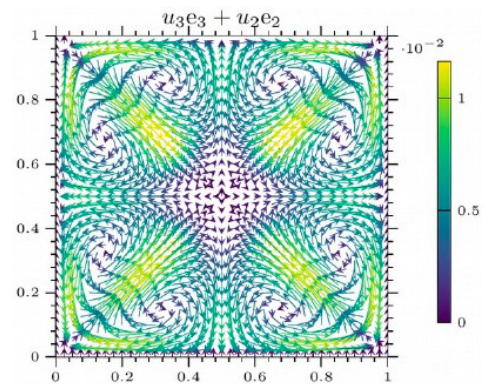


Figure 1: 2D numerical simulation of secondary flows. Reproduced from the PhD thesis of F. Hagani [7].

(PTV), and planar laser-induced fluorescence (PLIF), to investigate the impact of secondary structures on mass and heat transfer.

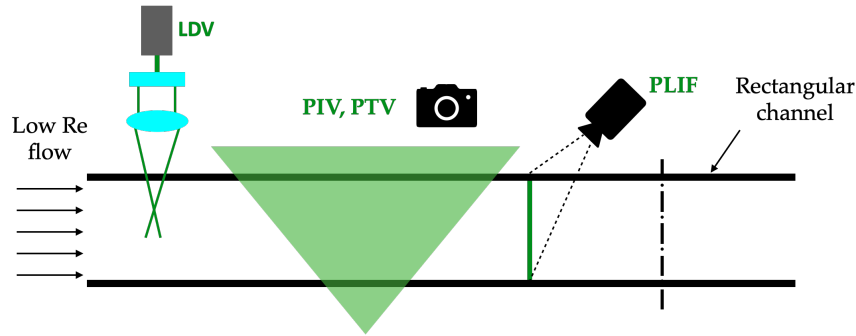


Figure 2: Measurement techniques for the analysis of secondary flows.

This setup will serve as a reference experimental benchmark for validating numerical approaches developed in this field. It will also provide experimental methods for analyzing secondary flows, thereby improving our understanding of the mechanisms underlying their formation in non-circular channels.

Candidate profile:

The candidate is currently in the second year of a Master's degree (or equivalent) in fluid mechanics or rheology and has a strong interest in experimental work.

The selected candidate will be required to participate in the MEGA Doctoral School selection process in June 2026.

Applicants are invited to send a CV, a cover letter, and transcripts for both years of the Master's program to:

- Eliane Younes - MCF INSA Lyon (eliane.younes@insa-lyon.fr),
- Shihe Xin - PR INSA Lyon (shihe.xin@insa-lyon.fr),
- Hervé Pabiou - CR CNRS (herve.pabiou@insa-lyon.fr),
- M'hamed Boutaous - PR INSA Lyon (mhamed.boutaous@insa-lyon.fr).

References :

- [1] S.S. Datta et al., Perspectives on viscoelastic flow instabilities and elastic turbulence, *Phys. Rev. Fluids*, 7, 080701, 2022.
- [2] D. R. Oliver et al., Laminar-flow non-newtonian heat transfer in flattened tubes, *Can. J. Chem. Eng.*, 49, 236, 1971.
- [3] J.P. Hartnett et al., Heat transfer to a viscoelastic fluid in laminar flow through a rectangular channel, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 28, 1147, 1985.
- [4] M.F. Letelier, D. A. Siginer, Secondary flows in tubes of arbitrary shape, *Rheology Series*, 8, 179, 1999.
- [5] R. Keunings, On the high Weissenberg number problem, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 20, 209, 1986.
- [6] X. Zheng et al., Pattern selection in Rayleigh-Bénard convection with nonlinear viscoelastic fluids, *Phys. Rev. Fluids*, 7, 023301, 2022.
- [7] Hagani F., Simulation numérique du transfert convectif dans un écoulement viscoélastique. *INSA Lyon, PhD*, 2021.