

# THESE DE DOCTORAT DE

NANTES UNIVERSITE

ECOLE DOCTORALE N° 602

*Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes*

Spécialité : « *Energétique, thermique, combustion* »

Par

**Mosbah KIWAN**

Experimental study for in-line mixer for non-Newtonian fluids

Thèse présentée et soutenue à Nantes, le \*\* Octobre 2025

Unité de recherche : Laboratoire de Thermique et Energie de Nantes (LTeN)

## Rapporteurs avant soutenance :

Georgios GEORGIYOU

Professor, Department of Mathematics and Statistics, Oceanography Center, University of Cyprus

Miguel MOYERS GONZALEZ

Associate Professor, School of Mathematics & Statistics, University of Canterbury

## Composition du Jury:

Examineurs :

Talib DBOUK

Pierre JOP

Professeur des Universités, Labo CORIA, Université de Rouen  
Chargé de recherche CNRS/Saint Gobain, Surface du Verre et interface (SVI), UMR 125

Dir. de thèse :

Cathy CASTELAIN

Directeur de recherche CNRS, LTeN, Nantes Université

Co-dir. de thèse :

Teodor BURGHELEA

Directeur de recherche CNRS, LTeN, Nantes Université

**Titre:** Étude expérimentale d'un mélangeur en ligne pour fluides non newtoniens

**Mots clés:** Laminar chaotic advection, Non-Newtonian fluids, In-line mixer, Mixing efficiency, Particle Image Velocimetry (PIV), Laser-Induced Fluorescence (LIF)

**Résumé :** Cette thèse présente une étude expérimentale sur l'efficacité du mélange par advection chaotique en régime laminaire dans des écoulements périodiquement forcés dans le temps, au sein d'un mélangeur en ligne, en utilisant des fluides non newtoniens. Les fluides étudiés sont des solutions de carboxyméthylcellulose (CMC) à comportement rhéofluidifiant, ainsi que des gels de Carbopol présentant une contrainte seuil, et un fluide newtonien (EMKAROX) utilisé comme référence de base. L'étude examine comment les variations de la rhéologie influencent le comportement de mélange sous des conditions cinématiques contrôlées, en particulier par l'ajustement du nombre de Strouhal (représentant la fréquence de la perturbation) et du rapport de vitesses (rapport entre la vitesse d'oscillation des cylindres et la vitesse de l'écoulement principal). Des mesures par vélocimétrie par images de particules (PIV) et fluorescence induite par laser (FIL) ont été utilisées pour caractériser les champs

de vitesses et le transport scalaire. Des codes Python développés en interne ont permis le traitement d'images et l'analyse quantitative des données. À partir de ces données, plusieurs indicateurs clés ont été évalués, notamment l'écart-type du champ de concentration, les distributions des temps de séjour, ainsi que les exposants de Lyapunov à temps fini (FTLE), afin d'évaluer la performance de mélange et de quantifier le degré de chaos lagrangien. La distribution spatiale des structures caractéristiques de l'écoulement, telles que les points hyperboliques et elliptiques gouvernant la déformation locale et le mélange scalaire, a été visualisée afin de mieux comprendre les mécanismes de transport sous-jacents. Une étude systématique de l'influence du nombre de Strouhal et du rapport de vitesses a permis de révéler comment le forçage dynamique interagit avec la rhéologie du fluide, menant à l'identification des conditions optimales pour un mélange efficace.

**Title:** Experimental study for in-line mixer for non-Newtonian fluids

**Keywords:** Laminar chaotic advection, Non-Newtonian fluids, In-line mixer, Mixing efficiency, Particle Image Velocimetry (PIV), Laser-Induced Fluorescence (LIF)

**Abstract:** This thesis presents an experimental study on the mixing efficiency of laminar chaotic advection in time-periodically forced flows within an inline mixer, using non-Newtonian fluids. The fluids investigated include shear-thinning carboxymethyl cellulose (CMC) solutions and yield stress Carbopol gels, with a Newtonian fluid (EMKAROX) serving as a baseline reference. The study examines how variations in fluid rheology influence mixing behavior under controlled kinematic conditions, specifically through the adjustment of the Strouhal number (representing the frequency of perturbation) and the speed ratio (the ratio of cylinder oscillation speed to bulk flow velocity). Particle Image Velocimetry (PIV) and Laser-induced Fluorescence (LIF) measurements were employed to capture both velocity fields and scalar transport. Custom in-house Python codes were used for image processing and quantitative

analysis. From these data, several key indicators were extracted, namely, the standard deviation of the concentration field, residence time distributions, and finite-time Lyapunov exponents (FTLEs), to evaluate mixing performance and quantify the extent of Lagrangian chaos. The spatial distribution of key flow features, such as hyperbolic and elliptical points that govern local deformation and scalar mixing, was visualized to provide insight into underlying transport mechanisms. A systematic investigation of the Strouhal number and speed ratio revealed how dynamic forcing interacts with fluid rheology, leading to the identification of optimal conditions for efficient mixing.