

Transport et Temps de résidence dans les écoulements ouverts, chaotiques ou perturbés

Résumé

Ce travail de thèse porte sur les propriétés de transport d'écoulements ouverts perturbés par une instabilité hydrodynamique. En se basant sur la simulation numérique d'écoulements en canal plan stationnaires et pulsés, les distributions de temps de résidence (RTD) correspondant à leurs états perturbés sont calculées et utilisées pour caractériser finement leurs propriétés de transport.

Une première partie portant sur les RTD dans les mélangeurs chaotiques en ligne prolongeant les résultats de Raynal & Carrière (2015) permet de mettre en place les outils statistiques servant à quantifier la dispersion des RTD étudiées tout au long de la thèse. Notamment, la substitution de l'écart absolu moyen à l'écart-type est introduite et justifiée dans le cas de ces distributions à queue lourde.

La deuxième partie est consacrée à l'écoulement de Poiseuille plan dans lequel des ondes de Tollmien-Schlichting d'amplitude finie se propagent. La comparaison des RTD correspondant à cette configuration avec celle de l'écoulement de base permet de constater deux effets : d'abord la formation d'un pic de probabilité au niveau du « temps de résidence de l'onde », dû à l'entraînement des particules par les zones de recirculation ; ensuite, la correction de l'écoulement moyen induit une diminution du temps de résidence minimal et une augmentation subséquente de la dispersion de la RTD.

Dans la dernière partie, l'écoulement de canal plan pulsé en régime non linéaire saturé est considéré. En fonction de la fréquence et du taux de pulsation, les deux régimes non linéaires — de croisière et balistique (Pier & Schmid, 2017) — obtenus entraînent des dynamiques chaotiques radicalement différentes. Le régime balistique est identifié comme celui mélangeant le plus efficacement bien que peu énergétique. Le calcul des RTD dans ces différents régimes ainsi que pour le profil de Womersley de base mène au constat que le régime balistique est également celui qui augmente le moins la dispersion de la RTD. Dans le cadre de ce travail, les caractéristiques de ce régime se rapprochent ainsi de celles d'un mélangeur idéal : mélange efficace et dispersion des temps résidence minimale à coût énergétique réduit.

Mots-clés : mélange, transport, distributions de temps de résidence, instabilités hydrodynamiques

Abstract

This work is concerned with the transport properties of open flows perturbed as a result of a hydrodynamic instability. Direct numerical simulation of stationary and pulsatile channel flows allows us to compute residence time distributions (RTD) corresponding to their perturbed states and thus to finely characterize their transport properties.

In the first part of the study, and following the results of Raynal & Carrière (2015), in-line chaotic mixers are considered and statistical tools used throughout the whole thesis to measure RTDs' widths are introduced. In particular, the use of the mean absolute deviation instead of the standard deviation is justified in the case of the heavy-tailed distributions at hand.

The second part of this work deals with the plane Poiseuille flow in which finite-amplitude Tollmien-Schlichting waves are propagating. Comparison of RTDs for base and perturbed flows leads to the following two observations : first, a probability peak located at the “wave residence time” appears due to the advection of particles by the propagating vortices ; second, the mean flow correction leads to a decreased minimum residence time and thus to an increased width of the RTD.

In the final part, the pulsatile channel flow in nonlinear instability regimes is considered. Depending on the frequency and the amplitude of the pulsation, the two resulting nonlinear regimes — cruising and ballistic (Pier & Schmid, 2017) — lead to drastically different chaotic behaviours. It is shown that the ballistic regime displays the best mixing capabilities, even though it is less energetic. By computing the RTDs corresponding to these two regimes and those of the basic Womersley profile, the ballistic regime is also identified as the one which leads to the least increased width of the RTD. In the framework of the present study, this regime is thus the closest to an ideal mixer : it combines efficient mixing and low RTD width at moderate energy cost.

Keywords : mixing, transport, residence time distributions, hydrodynamic instabilities