



HAL
open science

Patterning in transitional channel flow

Yohann Duguet, Pavan Kashyap, Olivier Dauchot

► **To cite this version:**

Yohann Duguet, Pavan Kashyap, Olivier Dauchot. Patterning in transitional channel flow. 25e Congrès Français de Mécanique, Nantes, 29 août-2 septembre 2022, Aug 2022, Nantes, France. hal-04280095

HAL Id: hal-04280095

<https://hal.science/hal-04280095v1>

Submitted on 13 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Patterning in transitional channel flow

Y. DUGUET ^a, P. V. KASHYAP ^{a,b}, O. DAUCHOT ^c

a. LISN-CNRS, Université Paris-Saclay, F-91400 ORSAY, FRANCE, duguet@limsi.fr (12)

b. Indian Institute of Science, BENGALURU, INDE, pavan.kashyap@limsi.fr (12)

c. Gulliver-CNRS, ESPCI, F-75005 PARIS, FRANCE, olivier.dauchot@espci.fr (12)

Résumé

L'écoulement au sein d'un canal plan représente l'un des exemples canoniques d'écoulement instable, cependant l'apparition de la turbulence au sein de ce système reste actuellement un problème non totalement compris. A l'instar d'autres écoulements cisailés de paroi, la présence de structures à grande échelle, dont la dynamique temporelle est intermittente, rend la détermination du nombre de Reynolds critique ardue. Cette présentation, qui s'appuiera sur des concepts issus des systèmes dynamiques et de la physique statistique, prétend dresser un panorama des développements récents sur le sujet. En particulier, en se basant sur des simulations numériques intensives et des expériences récentes, nous montrerons l'existence d'un régime bien défini de motifs laminaire-turbulents. L'origine de tels motifs est renvoyée à une instabilité à grande longueur d'onde de l'écoulement homogène et turbulent associé. La notion d'instabilité sous-jacente est ici statistique, et les taux de croissance associés sont déterminés ici après un moyennage d'ensemble. La nature précise de cette instabilité, sa relation de dispersion ainsi que son lien avec les instabilités de type Turing, populaires en biologie théorique, seront discutées lors de la présentation.

Abstract

Incompressible plane channel flow is one of the canonical examples of shear flow instability, however the way transition sets in such a system is far from being well understood. As in other wall-bounded flows, the lowest Reynolds numbers at which turbulence is observed in numerics or in experiments remains a puzzle for theoreticians because of the unexplained intermittent large-scale dynamics. In this talk I will review some of the latest development on the topic using ideas by using large-scale direct numerical simulations and by borrowing from dynamical system theories and statistical physics. In particular recent evidence for a low-Reynolds number regime of large-scale laminar-turbulent patterning will be shown based on direct numerical simulation and experiments. The birth of such a regime is traced back to a modulational instability of the featureless turbulent flow. The notion of instability is understood here in a statistical sense, and the corresponding growth or decay rates are measured numerically after averaging over a large number of independent realisations. The exact nature of this instability, its dispersion relation as well as its relation with Turing instabilities occurring in biological systems, will be reviewed and discussed.

Mots clefs : Transition, écoulements parallèles, instabilité, coexistence laminaire-turbulent, relation de dispersion.

1 Introduction

La plupart des études d'écoulements turbulents se concentre sur les nombres de Reynolds élevés caractéristiques d'applications en ingénierie. A l'inverse, il est également stimulant d'étudier un écoulement turbulent aux nombres de Reynolds les plus bas possibles. Si la détermination d'une telle gamme de paramètres est déjà un défi en soi, comprendre la nature de l'écoulement associé en est un autre. De façon générique, en présence de parois solides, la transition vers la turbulence dans les écoulements incompressibles est de type sous-critique, ce qui implique qu'un écoulement localement turbulent peut coexister spatialement et temporellement avec un écoulement laminaire. De tels régimes dits intermittents sont connus depuis les années 1960 voire avant, mais ils n'ont été mis en évidence dans le cadre d'un canal plan seulement depuis qu'ils peuvent être simulés numériquement [1,2]. Les structures cohérentes associées forment des motifs approximativement réguliers, caractérisés, de façon surprenante, par un vecteur d'onde non aligné avec les directions principales de l'écoulement. Les caractéristiques géométriques de tels motifs ont été récemment documentées à partir de données numériques précises. De façon importante, il apparaît [2] que, lorsque le nombre de Reynolds augmente, le motif, avant de disparaître, devient une simple modulation d'amplitude de l'écoulement turbulent homogène associé. A partir de telles observations, il est aisé de supposer que l'origine des motifs laminaire-turbulent est simplement une instabilité modulationnelle [3] en présence d'un écoulement bruité. Le but de ce résumé est d'expliquer comment caractériser en pratique cette instabilité et notamment de déterminer numériquement la relation de dispersion associée.

2 Analyse et résultats

2.1 Paramètres numériques

L'écoulement au sein du canal plan de hauteur $2h$ est supposé ici newtonien et incompressible. Il est caractérisé par le nombre de Reynolds $Re_\tau = u_\tau h / \nu$, où ν est la viscosité cinématique du fluide considéré, et u_τ et la vitesse de friction associée, qui ne dépend que du gradient de pression imposé. Il est déjà établi qu'aucune instabilité linéaire de l'écoulement laminaire parabolique ne se manifeste en-deça de $Re_\tau \approx 107$ [1], ce qui justifie le caractère sous-critique de la transition à la turbulence pour des nombres de Reynolds plus bas. En particulier, un régime de turbulence non trivial a été reporté aussi bas que $Re_\tau = 40$ [4]. Les équations de Navier-Stokes incompressibles sont résolues ici à l'aide du code pseudo-spectral parallèle Channeflow2.0 développé à l'EPFL (Lausanne, Suisse), à l'aide des moyens informatiques mis à disposition par l'IDRIS en France. La résolution numérique est choisie conformément aux études turbulentes de référence. De grands domaines spatiaux sont nécessaires à la capture de plusieurs grandes longueurs d'onde instables, ce qui détermine, en plus des temps caractéristiques longs, le coût de la campagne de calculs. Guidés par les paramètres rapportés d'autres études récentes, un effort de calcul particulier a été fourni dans la gamme $Re_\tau \in [80 : 110]$.

2.2 Relation de dispersion

Afin de déterminer la relation de dispersion associée aux instabilités de l'écoulement turbulent, nous nous plaçons d'abord dans la gamme de paramètres où l'écoulement turbulent est stable. Dans un tel régime, il est simple de perturber le système à un temps initial $t=0$ l'écoulement en excitant instantanément tous les nombres d'onde pertinents. La phase de relaxation est ensuite répétée 40 fois par nombre

de Reynolds puis un moyennage d'ensemble est effectué. Les signaux de vitesse résultant du moyennage ne dépendent que du temps, et un fit exponentiel sur une décade permet de remonter jusqu'aux taux de croissance $\sigma(Re_\tau, \mathbf{k})$ (négatifs en partie réelle) associés, où $\mathbf{k} = (k_x, k_z)$ représente un vecteur d'onde dans le plan xz parallèle aux parois. Leur extrapolation jusqu'aux paramètres où $\sigma=0$, avec un pas de 1 en Re_τ , permet de déterminer un nombre de Reynolds critique ainsi qu'un vecteur d'onde critique. Les résultats numériques obtenus dans un domaine de $250h \times 2h \times 125h$ indiquent un nombre de Reynolds critique de $Re_\tau = 95 \pm 1$, correspondant à un vecteur d'onde $(k_x, k_z)=(0.16, 0.36)$. Ces résultats sont consistents avec les mesures expérimentales et numériques réalisées jusqu'à présent [1,2]. Nous notons cependant qu'en l'absence de détermination de taux de croissance, c'est-à-dire en utilisant simplement des quantités seuillées, le nombre de Reynolds critique est constamment sous-évalué par rapport à la présente valeur, par exemple la valeur de référence jusqu'à présent était plus proche de 90 [4]. Il a été vérifié qu'outre la bistabilité entre l'écoulement laminaire et le régime turbulent, aucune hystérésis n'existe le long de la branche turbulente.

2.3 Mécanismes sous-jacents

Il est important de noter que les taux de croissance ou de déclin associées n'apparaissent exponentiels qu'après moyennage d'ensemble. Ceci laisse de la place pour d'autres mécanismes non-modaux régulant la formation individuelle de motifs, par exemple des mécanismes de nucléation de trous laminaires au sein de l'écoulement turbulent instantané. Néanmoins, le caractère exponentiel après moyennage évoque la possibilité de comprendre ce phénomène de modulation d'amplitude de façon plus globale. Un mécanisme candidat, issu de la biologie théorique, est celui proposé par A. Turing en 1952 pour expliquer la formation d'inhomogénéités dans les systèmes vivants initialement homogènes. Ce mécanisme est basé sur la différence de valeur entre deux diffusivités lorsque deux substances en compétition jouent les rôles respectifs d'activateur et d'inhibiteur. Si un tel mécanisme est numériquement peu robuste, il a souvent été avancé que l'introduction d'un bruit numérique permettait d'élargir la validité à une bien plus grande gamme de paramètres. La principale difficulté théorique est ici d'associer à chaque substance une grandeur correspondante cachée dans les nombreux degrés de liberté des équations de Navier–Stokes. Récemment un modèle de type Turing [5] a été proposé dans un cadre mono-dimensionnel afin de représenter l'émergence de motifs laminaire-turbulents. L'accord qualitatif avec les simulations de Navier–Stokes mentionnées est bon, malgré le caractère constamment sous-critique de la bifurcation identifiée, non reproduit dans la base de données de référence.

Un certain nombre de questions restent en suspens, notamment concernant l'universalité du mécanisme proposé au sein même du groupe des écoulements cisailés. De plus, si le seuil d'apparition des motifs laminaire-turbulent est relativement clair, les mécanismes d'extinction de cette même turbulence à plus bas nombre de Reynolds restent encore insuffisamment exploré encore aujourd'hui.

Références

- [1] L. S. Tuckerman, M. Chantry, D. Barkley, Patterns in wall-bounded shear flows, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 52 (2020) 343–367.
- [2] M. Shimizi, P. Manneville, Bifurcations to turbulence in transitional channel flow, *Physical Review Fluids*, 4 (2019), 113903

- [3] A. Prigent, G. Grégoire, H. Chaté, O. Dauchot, W. van Saarloos, Modeled behavior of hydrodynamic bearings in thermal engine, *Physical review letters*, 89 (2002) 014501.
- [4] P. V. Kashyap, Y. Duguet, O. Dauchot, Flow statistics in the transitional regime of plane channel flow, *Entropy*, 22 (2020), 1001
- [5] P. Manneville, Turbulent patterns in wall-bounded flows : A Turing instability ?, *EPL*, 98 (2012), 64001