

Influence du confinement latéral dans un écoulement de Poiseuille - Rayleigh - Bénard

Sophie Mergui & Dominique Gobin

CNRS – Universités Paris 6 et Paris 11
FAST – UMR 7608
Bât. 502, Campus Universitaire, 91 405 Orsay Cedex
mergui@fast.u-psud.fr

Résumé :

Nous présentons une étude expérimentale portant sur les conditions de développement d'une instabilité rencontrée dans un écoulement d'air en conduite rectangulaire chauffée par le bas et refroidie par le haut. Le but de cette étude est de regarder l'influence des parois latérales sur le comportement de l'instabilité en faisant varier le rapport de forme transverse (largeur/hauteur) du canal ainsi que la nature de ces parois (rugueuses, lisses...). L'instabilité apparaît sous la forme de rouleaux orientés dans le sens de l'écoulement qui prennent naissance au voisinage des parois latérales. Nous montrons que le nombre de rouleaux est pair quel que soit le jeu de paramètres caractéristiques considéré mais que leur comportement dépend des conditions qui règnent sur les parois latérales (conditions thermiques, état de surface).

Abstract :

This paper concerns the experimental characterization of the convection patterns that develop in a channel flow heated from below. The aim of this work is to study the influence of the lateral walls on the development of the patterns by changing the aspect ratio (length/width) of the channel and the properties of the walls (smooth or rough). For the range of parameters under study the longitudinal pressure gradient coupled to the unstable temperature gradient results in the formation of stationary convective rolls aligned with the main flow direction. We show that the rolls number is always even and that the behaviour of the pattern depends on the properties of the lateral walls.

Mots-clefs :

Structures thermoconvectives ; Visualisations ; Instabilité convective

1 Introduction

Dans un écoulement forcé en conduite chauffée par le bas et refroidie par le haut, on observe des rouleaux contrarotatifs orientés dans le sens du gradient de pression imposé pour des nombres de Reynolds suffisamment élevés (typiquement $Re > O(10)$ dans l'air), appelés rouleaux longitudinaux, par opposition aux rouleaux transversaux observés lorsque le nombre de Reynolds est faible. Une première analyse de stabilité temporelle linéaire menée dans le cas d'un écoulement entre deux plaques infinies par Gage et al. (1968) a montré que ces rouleaux sont issus d'une première déstabilisation d'un écoulement de Poiseuille conducteur pour un nombre de Rayleigh critique égal à 1708 indépendant du nombre de Reynolds. Cependant, ce résultat était en contradiction avec toutes les expériences réalisées à faible nombre de Reynolds, dans lesquelles des structures transversales stables sont observées. La contradiction a été levée grâce à une analyse de stabilité réalisée par Luijckx (1983) dans un canal d'extension latérale finie pour de faibles valeurs du nombre de Reynolds. Ce travail a montré que les structures

transverses sont dans ce cas plus instables que les structures longitudinales et que la présence des parois latérales stabilise l'écoulement. Une revue complète des études concernant les rouleaux transversaux a été réalisée par Nicolas (2002). Une analyse linéaire spatio-temporelle conduite pour un écoulement entre deux plaques infinies par Carrière et al. (1999) montre qu'il existe une transition absolue/convective pour l'instabilité en rouleaux transversaux mais que les rouleaux longitudinaux sont toujours convectivement instables et qu'ils sont plus instables que les rouleaux transversaux pour des nombre de Reynolds suffisamment grands. Ces structures longitudinales sont ainsi le résultat d'une amplification de perturbations présentes dans l'écoulement. Ils ne seront donc détectés dans les expériences qu'à condition qu'un niveau de bruit suffisant soit présent en permanence dans le système.

L'observation d'un écoulement réel dans la zone d'entrée d'une conduite horizontale différentiellement chauffée montre que les rouleaux prennent naissance au voisinage des parois latérales puis se développent de proche en proche vers le centre au fur et à mesure que l'on avance dans le canal, comme on peut le voir sur la figure 1 ci-dessous issue d'une de nos expériences. La présence des parois latérales pourrait ainsi être vue comme une perturbation de l'écoulement théorique en milieu infini.

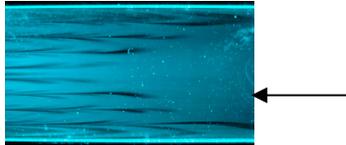


FIG. 1 – zone de développement des rouleaux longitudinaux – vue du dessus du début de la zone de chauffage (expérience réalisée par les auteurs).

Dans la plupart des expériences reportées dans la littérature, la longueur de la zone chauffée est faible. Par conséquent, la zone de développement des rouleaux occupe la majeure partie de la zone d'observation et la plage de paramètres caractéristiques balayés est réduite (nombre de Rayleigh élevé et nombre de Reynolds modéré). Des études expérimentales se sont intéressées à la zone de développement des rouleaux par des mesures de longueurs d'établissement ou à la caractérisation des structures pleinement développées par des mesures de vitesse et/ou de températures (Chiu et al. (1983), Mori et al. (1966), Chang et al. (1997)) mais très peu d'études ont été consacrées aux conditions d'apparition et de développement des rouleaux. Chang et al. (1998) ont étudié l'influence du rapport de forme sur les structures pour des nombres de Rayleigh élevés.

L'objectif de l'étude présentée ici est de montrer la sensibilité des structures longitudinales observées dans les expériences vis à vis des propriétés des parois latérales. Le montage expérimental utilisé pour notre étude se caractérise par une grande extension longitudinale du canal permettant d'observer des rouleaux longitudinaux pleinement développés pour une large gamme de nombres de Reynolds et de Rayleigh. Nous analysons l'évolution temporelle et spatiale des rouleaux longitudinaux et le nombre de rouleaux observés dans la zone établie pour plusieurs valeurs du rapport de forme transverse, variant de 5 à 11. Nous changeons la nature des parois latérales afin de briser la symétrie des conditions aux limites.

2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est présenté sur la figure 2. Un écoulement d'air de type Poiseuille établi est introduit dans un canal rectangulaire chauffé par le bas à la température T_C et refroidi par le haut par circulation d'eau dans un canal à la température $T_F = 20^\circ\text{C}$. La longueur sur laquelle est appliqué et contrôlé le chauffage est telle que les structures thermoconvectives peuvent se développer et s'établir avant la fin du canal. L'air qui entre dans la zone chauffée est à la température T_F . Le canal est disposé sur une table anti-vibration afin

d'atténuer au maximum le bruit extérieur et l'ensemble du dispositif est placé dans une pièce thermostatée maintenue à 20°C. Toutes les mesures sont réalisées à partir de visualisations par plan laser après ensemencement de l'écoulement avec une émulsion d'huile. Les prises de vue sont effectuées à l'aide d'un appareil photo numérique ou d'une caméra analogique. Une description détaillée du montage est disponible dans l'étude de Pabiou et al. (2005).

La paroi inférieure du canal est composée d'une zone d'entrée non chauffée de 40 cm, nécessaire à l'établissement hydrodynamique de l'écoulement ; une zone centrale constituée d'une plaque de cuivre de 2 m de longueur et 17,5 cm de largeur chauffée électriquement et d'une zone de sortie non chauffée. La plaque de cuivre est maintenue à température uniforme et constante par un contrôle en boucle fermée réalisé à l'aide de 22 thermocouples insérés à mi-hauteur de la plaque. Un contrôleur de débit alimenté par le réseau d'air comprimé permet d'imposer une valeur donnée du nombre de Reynolds, qui sera calculé à partir du diamètre hydraulique du canal. À la sortie du contrôleur, le fluide passe successivement dans une chambre de tranquillisation, un nid d'abeille, un convergent puis arrive dans le canal d'expériences.

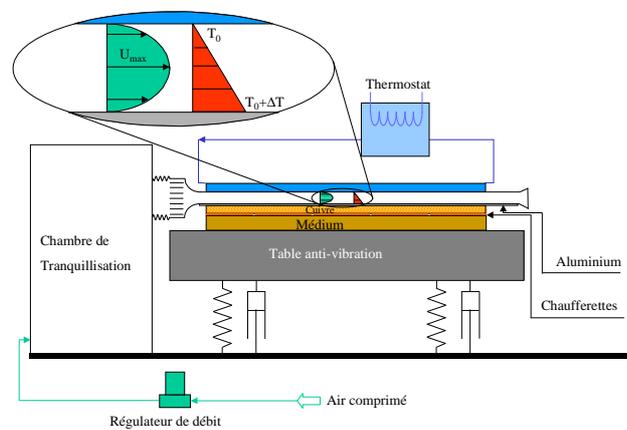


FIG. 2 – Dispositif expérimental.

Les parois latérales du canal d'air sont en matériau PVC de 16 mm de hauteur mobiles l'une par rapport à l'autre. Nous pouvons ainsi faire varier la largeur du canal et donc le rapport de forme transverse. La largeur est réglée dans un premier temps à l'aide de cales puis ajustée finement à partir de prises de vues de façon à obtenir une variation inférieure à 1 mm sur toute la longueur du canal. La largeur maximale que nous pouvons atteindre, conditionnée par la largeur de la plaque de cuivre, est 17,3 cm soit un rapport de forme transverse $B = \text{Largeur} / \text{Hauteur} = 10,8$. Il n'y a pas de restriction sur la largeur minimale.

La température à l'entrée du canal d'air est contrôlée via la température de la chambre thermostatée dans laquelle est placé le dispositif.

Toutes les expériences présentées dans ce papier ont été conduites pour un nombre de Rayleigh égal à 4500 et un nombre de Reynolds basé sur le diamètre hydraulique égal à 30.

3 Evolution temporelle et spatiale des rouleaux longitudinaux

Les visualisations des structures ont été réalisées dans des plans verticaux transverses situés à des distances variables de l'entrée du canal (de 10 cm à 180 cm de l'entrée).

À l'instant initial, tout le système (parois et écoulement d'air) est isotherme, à la température de la paroi froide. Nous imposons alors le chauffage de la paroi du bas et nous suivons au cours de temps l'évolution des structures qui se développent dans le canal.

Un scénario typique observé au premier stade de développement des rouleaux pour tous les rapports de forme étudiés est présenté sur la figure 3. Le temps initial correspond au début du chauffage.

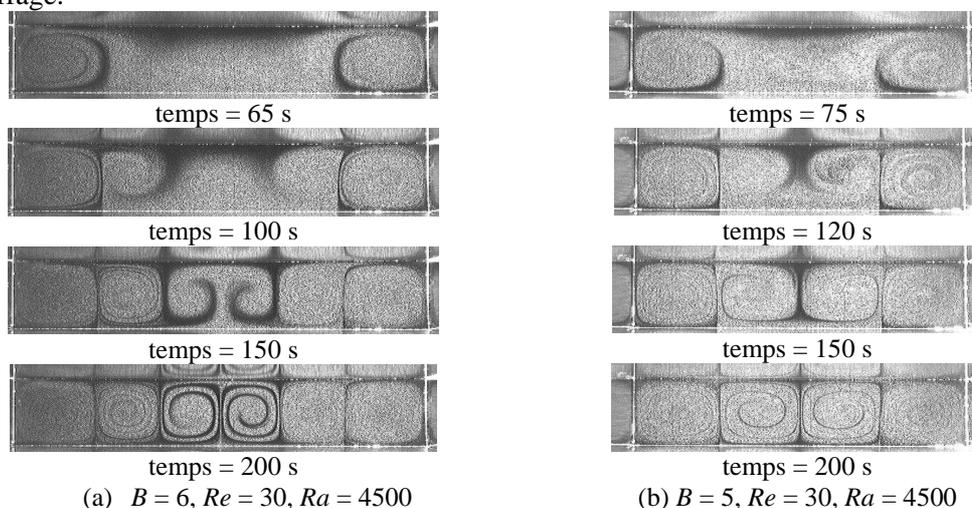


FIG. 3 – Evolution temporelle des rouleaux longitudinaux au cours de la phase de déclenchement. Coupe transversale située à 150 cm de l'entrée.

Les premiers rouleaux longitudinaux se déclenchent par paire au voisinage des parois latérales. Nous observons les premiers mouvements de convection naturelle dès les premiers instants après le déclenchement du chauffage, c'est-à-dire pour un nombre de Rayleigh très inférieur à 1708. Au voisinage immédiat des parois verticales initialement froides, il existe une zone dans laquelle du fluide froid se retrouve en contact avec du fluide plus chaud en bordure de couche limite thermique, créant ainsi un gradient horizontal de température donnant naissance à un mouvement de convection naturelle descendant le long de la paroi froide. Les rouleaux se développent ensuite de proche en proche vers le centre, par paire, pour donner un nombre pair de rouleaux contrarotatifs, quel que soit le rapport de forme B . A l'issue de cette phase, le nombre de rouleaux, N_r , est : $N_r = B$ si B est pair et $N_r = B-1$ si B est impair, et tel que les rouleaux le long des parois verticales sont descendants.

Cette première phase de développement est commune à tous les rapports de forme étudiés. Les rapports de forme pairs et impairs ont ensuite des comportements distincts au cours d'une seconde phase correspondant à un changement de sens de rotation des rouleaux le long des parois latérales. En effet, ces parois étant conductrices de la chaleur, elles se réchauffent progressivement au contact de la paroi chauffée jusqu'à atteindre leur état thermique d'équilibre. Elles sont alors plus chaudes que le fluide qui entre dans le canal à la température de la paroi froide, ce qui provoque un écoulement de convection naturelle ascendant à leur voisinage. Cet ajustement du sens de rotation des structures se produit de façon différente selon le rapport de forme.

3.1 rapports de forme pairs

Dans ce cas, le nombre de rouleaux issus de la première phase reste inchangé (égal au rapport de forme), mais l'écoulement est très perturbé pendant le temps correspondant à l'inversion du sens de rotation des rouleaux le long des parois latérales dans la zone d'entrée. La structure résultante est très stable et symétrique (figure 4), avec des rouleaux centraux parfaitement carrés et des rouleaux ascendants le long des parois verticales.

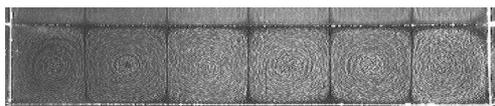


FIG. 4 – Coupe transversale à 150 cm de l'entrée pour un rapport de forme $B = 6$.
 $Re = 30$, $Ra = 4500$.

3.1 rapports de forme impairs

Dans ce cas, le changement de rotation des rouleaux le long des parois latérales s'effectue en suivant un scénario bien structuré comme on peut le voir dans la séquence présentée sur la figure 5 (suite de la séquence 3 (b)). Cette phase se caractérise par l'apparition transitoire d'une paire de rouleaux supplémentaire au centre du canal. Une fois cette paire en place, les rouleaux descendants le long des parois latérales perdent progressivement de leur intensité au profit des rouleaux centraux et finissent par disparaître. La structure résultante correspond à un nombre de rouleaux N_r égal à $B - 1$ tel que les rouleaux sont ascendants le long des parois verticales avec de larges rouleaux centraux. Nous avons récemment mené une étude, non présentée ici, qui montre que sous certaines conditions d'entrée, cette configuration est instable et peut bifurquer pour donner naissance à une paire stable de rouleaux supplémentaires aboutissant à un nombre de rouleaux égal à $B + 1$.

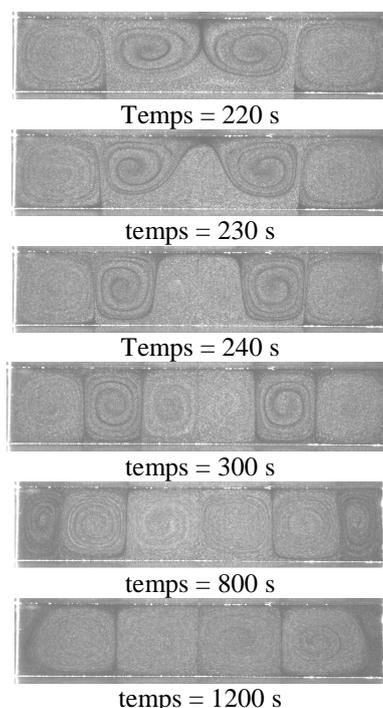


FIG. 5 – Evolution temporelle des rouleaux longitudinaux au cours de la phase de changement de sens de rotation le long des parois verticales. Apparition d'une paire de rouleaux centraux et disparition progressive des rouleaux extrêmes. Coupe transversale située à 150 cm de l'entrée.
 $B = 5$, $Ra = 4500$, $Re = 30$.

4 Influence de l'état de surface des parois latérales

Afin de regarder l'influence des propriétés des parois latérales sur le processus de déclenchement des structures, nous avons brisé la symétrie du système en modifiant l'état de surface d'une des parois latérales. Une portion d'une des parois latérales a été rendue rugueuse

dans la zone de développement des premiers rouleaux. La figure 6 illustre le type de motif obtenu pour un rapport de forme égal à 11.



FIG. 6 – Coupe transversale à 150 cm de l'entrée pour un rapport de forme $B = 11$.
 $Re = 30, Ra = 4500$.

On observe une dissymétrie du motif avec un nombre impair de rouleaux et une zone perturbée au voisinage de la paroi modifiée dans laquelle le premier rouleaux n'a pas pu se développer. Cette expérience montre la grande sensibilité des structures aux éventuels défauts sur les parois verticales.

4 Conclusions

Ce travail avait pour objectif d'étudier l'influence des parois latérales sur les motifs de convection observés dans un écoulement d'air en conduite chauffée par le bas et refroidie par le haut. Les rouleaux longitudinaux étudiés sont le résultat d'une instabilité de nature convective qui se déclenche dans les expériences grâce à la présence de parois latérales. Nous avons montré que le processus de formation de ces structures aboutissait à des motifs symétriques composés d'un nombre pair de rouleaux quel que soit le rapport de forme. Pour les conditions aux limites considérées dans ce travail, nous avons pu établir que le nombre de rouleau, N_r , obéit à la règle suivante :

$$\begin{array}{lll} N_r = B & \text{si} & B \text{ est pair} \\ N_r = B - 1 & \text{si} & B \text{ est impair} \end{array}$$

Nous avons mis en évidence la grande sensibilité des motifs observés aux conditions thermiques et dynamiques régnant sur les parois latérales, ce qui rend les études expérimentales sur ce type d'instabilité particulièrement délicates à entreprendre.

Références

- Carrière, P., Monkewitz P.A. 1999 Convective versus absolute instability in mixed Rayleigh-Bénard-Poiseuille convection. *J. of Fluid Mech.* **384**, 243-262.
- Chang, M.Y., Lin, T.F. (1998) Experimental study of aspect ratio effects on longitudinal vortex flow in mixed convection of air in a rectangular duct. *Int. J. Heat Mass Transfer* **41**, 719-733.
- Chang, M.Y., Yu, C.H., Lin, T.F. (1997) Changes of longitudinal vortex roll structure in a mixed convective air flow through a horizontal plane channel, *Int. J. Heat Mass Transfer* **40**, 347-363.
- Chiu, K.C., Ouazzani, J., Rosenberger, F. (1983) Mixed convection between horizontal plates – II. Fully developed flow. *Int. J. Heat Mass Transfer* **261**, 109-120.
- Gage, K.S., Reid, W.H. 1968 The stability of thermally stratified plane Poiseuille flow. *J. of Fluid Mech.* **33**, 21-32.
- Mori, Y., Uchida, Y. (1966) Forced convective heat transfer between horizontal flat plates. *Int. J. Heat Mass Transfer* **9**, 803-817.
- Nicolas, X. 2002 Revue bibliographique sur les écoulements de Poiseuille-Rayleigh-Bénard: écoulements de convection mixte en conduite rectangulaires horizontales chauffées par le bas, *Int. J. Thermal Sciences* **41**, 961-1016.
- Ouazzani, M.T., Caltagirone, J.P., Meyer, G., Mojtabi, A. 1989 Etude numérique et expérimentale de la convection mixte entre deux plans horizontaux à températures différentes – I. *Int. J. Heat Mass Transfer* **32**, 261-269.
- Pabiou, H., Mergui, S., Bénard, C. (2005) Wavy secondary instability of longitudinal rolls in Rayleigh-Bénard-Poiseuille flows. *J. Fluid Mech.* **542**, 175-194.