

Étude expérimentale de la dynamique basse fréquence d'une bulle de recirculation laminaire

P.-Y. Passaggia,^a T. Leweke,^a U. Ehrenstein,^a M. Marquillie,^b F. Gallaire^c

a. IRPHÉ-UMR 6594, CNRS, Aix-Marseille Université, F-13384 Marseille, France

b. LML, CNRS, Blv. Paul Langevin, F-59655 Villeneuve d'Ascq, France

c. EPFL-LFMI, Route Cantonale, CH-1015 Lausanne, Suisse

Résumé :

Un écoulement de type couche limite laminaire au-dessus d'une bosse optimisée pour le décollement est étudié expérimentalement. Cette configuration permet de générer une longue bulle de recirculation, soumise à un battement basse fréquence que l'on cherche à caractériser. Comme précédemment observé dans les simulations numériques, deux instabilités coexistent au sein de la bulle de recirculation. La première est une instabilité de type centrifuge qui fait apparaître des modulations dans la direction transverse de l'écoulement. La seconde, qui est responsable du battement basse fréquence est associée, à l'interaction non normale de modes globaux.

Abstract :

A separated laminar boundary-layer flow over a shallow bump is investigated experimentally. This configuration generates an elongated recirculation bubble subject to a low frequency flapping. Previous numerical simulations have shown that, for this configuration, two instabilities coexist. A centrifugal instability of the recirculation bubble is first investigated. A low frequency flapping is associated with a two-dimensional instability due to the non normal interaction of two global modes.

Mots clefs : Décollement, instabilité, battement

1 Introduction

Le décollement de la couche limite est une conséquence naturelle des écoulements proche d'une paroi dès lors qu'une évolution de la géométrie se produit. Les bulles de recirculation allongées ainsi produites sont sources de phénomènes d'instabilité qui conduisent à une perte de performances aérodynamiques. Une meilleure connaissance des mécanismes responsables de ces instabilités est essentielle afin de proposer à terme des solutions de contrôle. Le battement basse fréquence des couches limites laminares décollées a été observé expérimentalement [2] ainsi que dans les simulations numériques du système de Navier-Stokes, que le décollement soit provoqué par une évolution de la géométrie [1] ou par un gradient de pression adverse [5][7]. Dans le cas présent, on considère un écoulement de type couche limite laminaire où le décollement est provoqué par une bosse optimisée à cet effet. L'expérience reproduit la même géométrie que l'étude numérique [4] et la dynamique instationnaire de l'écoulement est étudiée expérimentalement. La simulation numérique directe du système de Navier-Stokes [6] montre un battement de la zone de cisaillement qui a été analysé dans [3] grâce à une étude en modes globaux de la dynamique linéaire. Cette étude numérique a montré que le mécanisme du battement basse fréquence pouvait être expliqué par l'interaction non normale de modes globaux instables. Cette étude met aussi l'accent sur les fortes croissances transitoires produites par cet écoulement. Plus récemment, la possibilité d'une instabilité tri-dimensionnelle a été étudiée numériquement [4]. Le mécanisme responsable de cette instabilité a été identifié comme une instabilité de type centrifuge de la bulle de recirculation. Les taux de croissance de cette instabilité sont faibles et ne semblent pas capables d'influencer la dynamique du battement basse fréquence. Une instabilité similaire a été observée dans

le cas d'un écoulement décollé à l'arrière d'une marche descendante. Ici nous présentons des observations expérimentales de ces deux phénomènes : le battement basse fréquence ainsi que l'instabilité transverse de la bulle de recirculation. Le montage expérimental est décrit au chapitre 2. Les résultats préliminaires sur l'instabilité transverse ainsi que sur le battement basse fréquence sont présentés au chapitre 3. Enfin quelques perspectives sont données au chapitre 4.

2 Montage expérimental

L'expérience reproduit la même géométrie que celle utilisée dans [4] et est constituée d'une plaque plane de Plexiglas avec un bord d'attaque bisoté. Ce dispositif permet de générer un couche limite laminaire le long de l'intégralité de la plaque. La bosse est disposée sur la plaque et la figure 1 montre son graphe. On définit l'axe x comme la direction de l'écoulement incident, l'axe y comme la direction normale à la paroi et l'axe z étant la direction transverse.

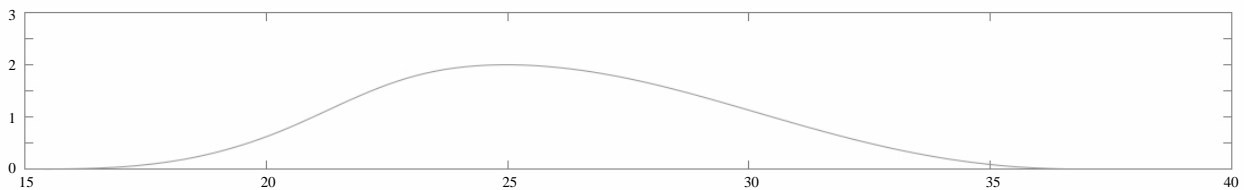


FIG. 1 – Géométrie de la bosse. Les coordonnées sont normalisées par l'épaisseur de déplacement de la couche limite.

Les expériences ont été menées dans un canal hydrodynamique avec une veine d'essai de dimensions 0.375 m (large) \times 0.5 m (haut) \times 1.5 m (long). Alors que la plaque plane en Plexiglas occupe toute la largeur du canal, une attention particulière a été apportée afin de minimiser les effets de bords. La bosse d'une largeur de 0.335 m est encastrée entre une deuxième série de parois en Plexiglas d'une largeur de 3 mm . Ce dispositif supplémentaire commence à 10 mm du début de la bosse, permettant de limiter les mouvements transverses indésirables au sein de la bulle de recirculation. La hauteur h de la bosse est de 5 mm alors que l'épaisseur de la couche limite δ varie entre 2 mm et 3 mm . Le nombre de Reynolds basé sur l'épaisseur de déplacement de la couche limite ainsi que sur la vitesse U_∞ de l'écoulement incident est varié de 300 à 600 . La hauteur relative de la bosse se trouve dans l'intervalle $1.5 \leq h/\delta \leq 2.5$.

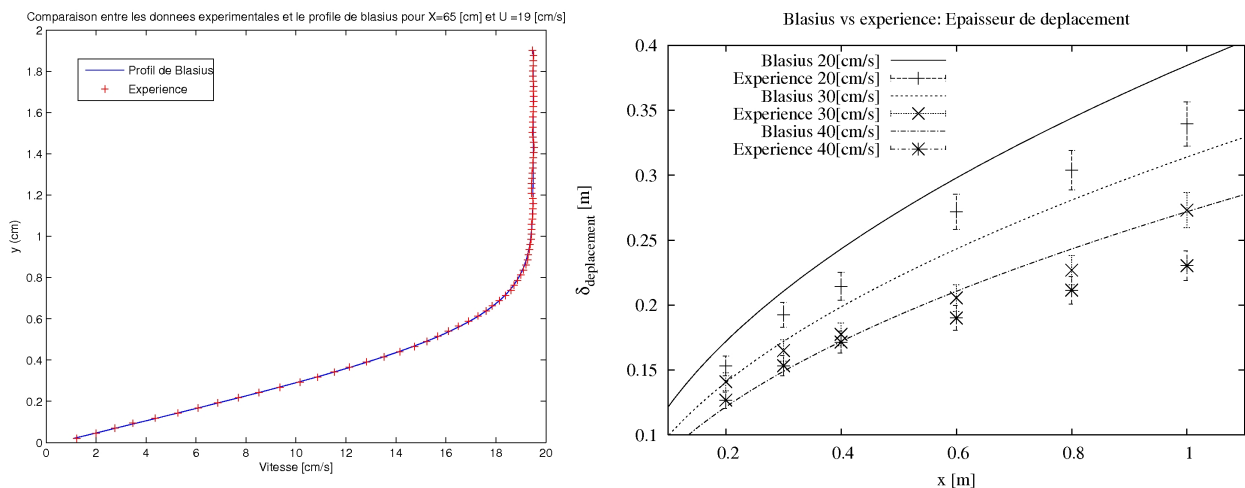


FIG. 2 – Exemple du profil expérimental et épaisseur de couche limite le long de la plaque pour différents nombres de Reynolds.

Le profil de vitesse de la couche limite a été mesuré en utilisant un dispositif de vélocimétrie par

images de particules (PIV). Il correspond à la solution de Blasius avec moins de 1% d'erreur sur l'intégralité de la plaque plane. Afin de générer un écoulement laminaire, un clapet permet de réguler les forces de pression entre le fluide qui passe au-dessus et en dessous de la plaque. L'introduction de ce dispositif modifie le gradient de pression ce qui diminue l'épaisseur de la couche limite par rapport aux prédictions théoriques. Un exemple est présenté sur la figure 2.

3 Instabilité transverse et battement basse fréquence

Une injection de colorant dans la zone de recirculation ou en amont a permis une première évaluation des phénomènes d'instabilité. Le colorant a été illuminé par l'arrière dans un plan $(x - y)$ par un laser argon pour la visualisation du battement ou dans un plan transverse $(y - z)$ pour la visualisation du mode transverse.

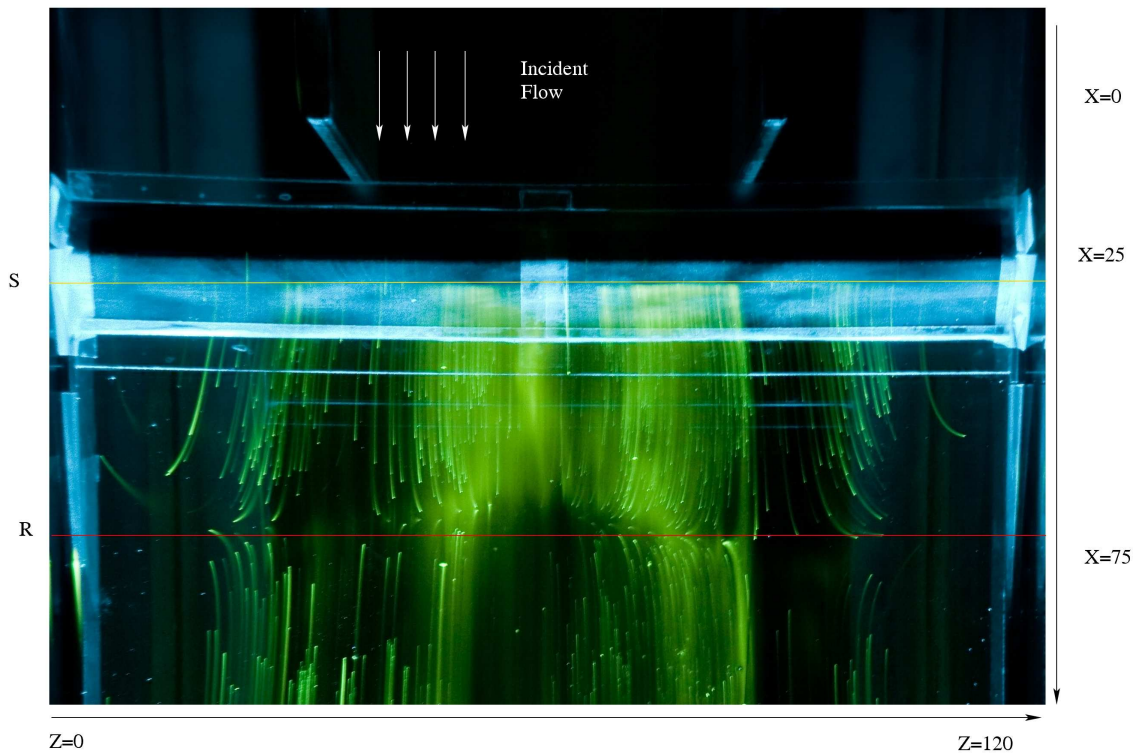


FIG. 3 – Lignes de courant de proche paroi visualisées à l'aide de fluorescein peint à l'arrière de la bosse.

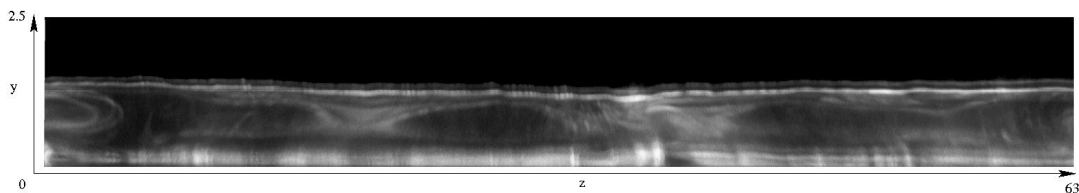


FIG. 4 – Distribution du colorant dans le plan $(y - z)$ pour une distance $x/\delta = 13$ par rapport au sommet de la bosse.

L'instabilité transverse de la bulle de recirculation commence à apparaître pour $Re = 290$ et $h/\delta = 1.7$ et des modulations du colorant à l'intérieur de la bulle sont visibles. Ces modulations se traduisent par des vortex longitudinaux de faible amplitude. Une coupe dans le plan $(y - z)$ proche de la bosse

permet d'identifier la longueur d'onde dominante du mode. Une expérience a été menée pour $Re = 392$ et $h/\delta = 1.7$ et la figure 4 montre la structure du mode. La longueur d'onde adimensionnée déterminée dans l'expérience est de $L_z = 15 \pm 2$. La longueur d'onde calculée numériquement pour $Re = 400$ et $h = 2$ est $L_z = \pi/0.125 = 12.6$ [4].

Le nombre de Reynolds est progressivement augmenté jusqu'à $Re = 480$ et $h/\delta = 2.17$. Pour cette gamme de paramètres, le battement basse fréquence domine la dynamique instable de la bulle de recirculation. Ce comportement est illustré dans la figure 5.

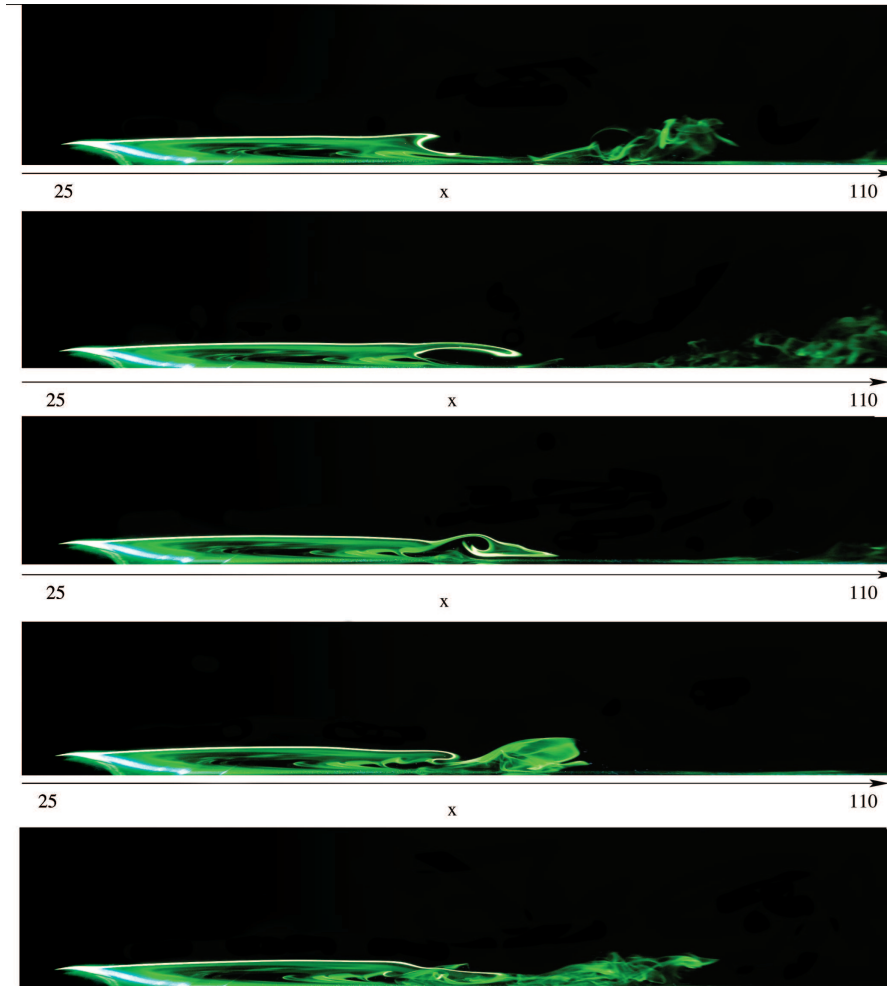


FIG. 5 – Sequence du battement basse fréquence pris à 0.25 Hz pour $Re = 480$ et $h/\delta = 2.17$.

La période des oscillations de la couche de cisaillement a été mesurée en intégrant sur la hauteur l'élévation de la zone de recirculation qui renferme le colorant. Une transformée de Fourier de ce signal montre un pic basse fréquence $f\delta/U_\infty = 0.0075$ qui est comparé sur la figure 6 au calcul numérique pour $Re = 610$ et $h/\delta = 2$. Ces résultats sont en très bon accord avec les résultats numériques ce qui suggère que le scénario d'une interaction modale est le mécanisme du battement basse fréquence.

Les possibilités de quantifier l'amplitude du mode transverse aet de caractériser les modes responsables du battement basse fréquence en utilisant les méthode PIV est en cours d'investigation. Par ailleurs, les méthodes de traitement d'images de type Koopman semblent capables de fournir plus d'informations sur la structure et la fréquence des modes localisés dans la bulle de recirculation [8].

4 Perspectives

Une étude expérimentale préliminaire a permis d'identifier les phénomènes d'instabilité au sein d'une bulle de recirculation laminaire. Bien que l'instabilité transverse aie un taux de croissance faible,

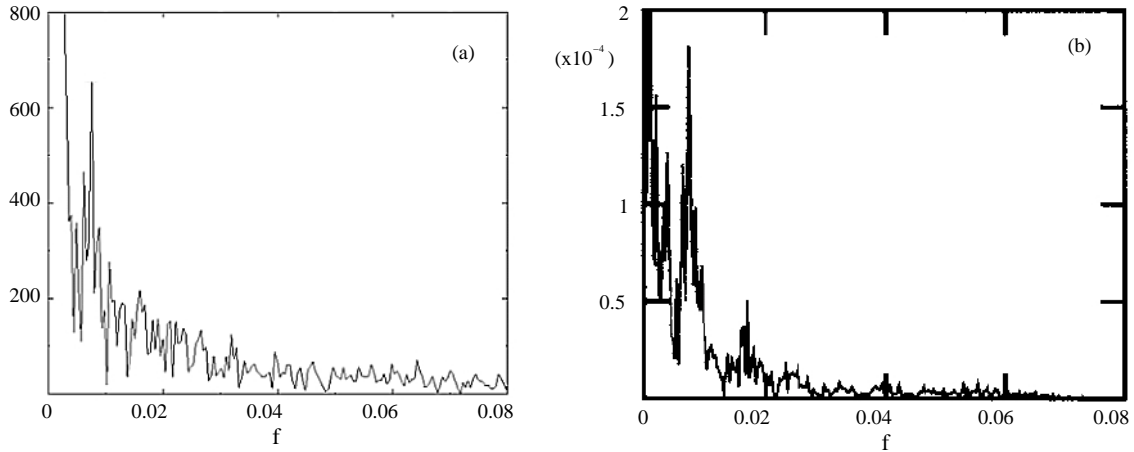


FIG. 6 – Spectre de puissance de l'élevation locale de la bulle de recirculation pris à $x/\delta = 45$ pour (a) $Re = 480$ et $h/\delta = 2.17$ dans l'expérience, (b) $Re = 600$ et $h/\delta = 2$ dans la DNS.

l'injection de colorant a permis une première quantification du mode dans une gamme de paramètres proche du calcul numérique. L'instabilité liée au flapping a été mesurée en utilisant la même technique et le battement basse fréquence de la bulle de recirculation montre de fortes similarités avec le calcul numérique. La possibilité de quantifier l'amplitude du mode transverse ainsi que la structure des modes instables responsable du battement, en utilisant la vélocimétrie par images de particules, sont en cours d'étude. Une attention particulière est apportée à la possibilité d'identifier une interaction entre modes instables pour le battement basse fréquence, étant donné que ce type d'instabilité est aussi observé dans des configurations compressibles.

5 Remerciements

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'Agence Nationale de la Recherche portant la référence ANR-09-SYSC-011.

Références

- [1] N.J. Cherry, R. Hiller, and M.P. Latour. Unsteady measurements in a separating and reattaching flow. *J. Fluid Mech.*, 144 :13– 46, 1984.
- [2] A.V. Dovgal, V.V. Kozlov, and A. Michalke. Laminar boundary layer separation : instability and associated phenomena. *Prog. Aerospace Sci.*, 30 :61– 94, 1994.
- [3] U. Ehrenstein and F. Gallaire. On two-dimensional temporal modes in spatially evolving open flows : the flat-plate boundary layer. *J. Fluid Mech.*, 536 :209–218, 2005.
- [4] F. Gallaire, M. Marquillie, and U. Ehrenstein. Three-dimensional transverse instabilities in detached boundary-layers. *J. Fluid Mech.*, 571 :221–233, 2007.
- [5] C. P. Häggmark, A.A. Bakchinov, and P.H. Alfredsson. Experiments on a two-dimensional laminar separation bubble. *Phi. Trans. R. Soc. Lond. A.*, 358 :3193– 3205, 2000.
- [6] M. Marquillie and U. Ehrenstein. On the onset of nonlinear oscillations in a separating boundary-layer flow. *J. Fluid Mech.*, 490 :169– 188, 2003.
- [7] L.L Pauley, P. Moin, and W.C. Reynolds. The structure of two-dimensional separation. *J. Fluid Mech.*, 220 :397– 411, 1990.
- [8] C.W. Rowley, I. Meziç, S. Bagheri, S. Schlatter, and Henningson D. Spectral of nonlinear flows. *J. Fluid Mech.*, 641 :115–127, 2009.