



HAL
open science

Caractérisation expérimentale du décollement instationnaire autour d'un obstacle 2D

Fawzi Fadla, Laurent Keirsbulck, Jean-Philippe Laval, Larbi Labraga

► **To cite this version:**

Fawzi Fadla, Laurent Keirsbulck, Jean-Philippe Laval, Larbi Labraga. Caractérisation expérimentale du décollement instationnaire autour d'un obstacle 2D. CFM 2013 - 21ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2013, Bordeaux, France. hal-03439756

HAL Id: hal-03439756

<https://hal.science/hal-03439756>

Submitted on 22 Nov 2021

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.

Caractérisation expérimentale du décollement instationnaire autour d'un obstacle 2D

F. Fadla^a, L. Keirsbulck^a, D. Boussemart^a, J-P. Laval^b, L. Labraga^a

a. TEMPO, EA 4542, 59313 Valenciennes, Université Lille Nord de France

b. LML, CNRS UMR 8107, 59491 Villeneuve d'Ascq, Université Lille Nord de France

Résumé :

Nous présentons les résultats expérimentaux concernant le décollement de couche limite autour d'un obstacle 2D en écoulement confiné de type canal plan. L'objectif est d'étudier d'une part l'influence du nombre de Reynolds sur le phénomène de décollement et d'autre part les mécanismes instationnaires associés. L'originalité de l'étude réside dans l'emploi de la méthode électrochimique polarographique qui a permis de caractériser le frottement pariétal sur l'obstacle. Ces résultats, et notamment les statistiques du frottement pariétal sont comparés favorablement avec une simulation numérique récente sur cette même configuration d'essai.

Abstract :

We present in this study some experimental results on the boundary layer separation over a 2D bump in a turbulent channel flow. The aim is first to study the separation Reynolds number dependency and secondly we focus on unsteady separation processes. The originality of this work is the use of the electrochemical method for the unsteady wall-shear stress characterization over the bump. The present measurements and especially the wall-shear stress statistics are compared and are in good agreement with a recent numerical simulation in the same configuration.

Mots clefs : Décollement ; gradient de pression ; frottement pariétal instationnaire

1 Introduction

Le décollement de la couche limite est un phénomène physique ayant fait l'objet d'une multitude de travaux dont les principaux sont répertoriés dans la synthèse de Simpson [7]. Cet engouement s'explique par le fait que ce phénomène peut s'avérer extrêmement pénalisant et conduire notamment à des pertes importantes en termes de performances aérodynamiques. C'est pourquoi sa prédiction ainsi que son contrôle constituent un enjeu majeur [2]. Mais aujourd'hui encore, la position du point de décollement sur des configurations académiques relativement simples telles qu'une rampe arrondie [9] ou une bosse [10], est encore difficile à prévoir car le décollement, dans ce cas dû au gradient de pression adverse, n'est pas fixé par la géométrie contrairement au cas d'une marche descendante et peut donc osciller. Dans la littérature, on retrouve un certain nombre d'études traitant d'écoulements soumis à la fois à un effet de courbure et à un gradient de pression adverse. Ces configurations, très importantes car représentatives des écoulements décollés industriels, sont donc potentiellement sensibles à l'écoulement incident qui peut affecter directement le décollement et par conséquent la longueur de recollement. L'une des questions essentielles est donc de savoir si le décollement peut exister en fonction de la nature de l'écoulement, ainsi que du nombre de Reynolds considéré. On note qu'un nombre limité d'études à nombre de Reynolds élevé a été mené par le passé sur ce type d'écoulement décollé et que la plupart des travaux ont été consacrés à la stabilité en régime laminaire. Il faut donc être vigilant quant à l'interprétation des résultats qui concernent souvent des écoulements à bas nombre de Reynolds. Une autre caractéristique du décollement de couche limite est d'être par nature fortement instationnaire et multi-échelles, l'analyse dynamique qui lui est associée est donc

rendue très complexe et nécessite la mise en oeuvre de méthodes expérimentales et de simulation numérique avancées. C’est dans cette optique que des essais expérimentaux ont été conduits, à l’aide de la méthode électrochimique polarographique [3], et présentés dans cette communication, sur un obstacle 2D de type “bosse” en écoulement turbulent confiné. On connaît l’importance des fluctuations de pression pariétale qui sont à l’origine de phénomènes aéroacoustiques à savoir le bruit auquel est soumis l’écoulement considéré. Une meilleure connaissance de ces instationnarités revêt dès lors une grande importance dans une perspective de contrôle. Notre objectif est ici de fournir une base de données expérimentales de référence, en complément des simulations DNS menées au Laboratoire de Mécanique de Lille [6]. Cette base de données expérimentale servira également au développement de méthodes de contrôle des décollements, travaux menés dans le cadre du projet CACOD.

2 Configuration d’étude

L’écoulement décollé étudié dans ces travaux est celui produit en aval d’une bosse dont la particularité est d’induire un bulbe décollé provoqué par le gradient de pression adverse dû à la courbure de la bosse. Cette géométrie (figure 1) a été conçue à l’origine par le groupe DASSAULT AVIATION pour reproduire en régime turbulent le gradient de pression de l’extrados d’un profil d’aile

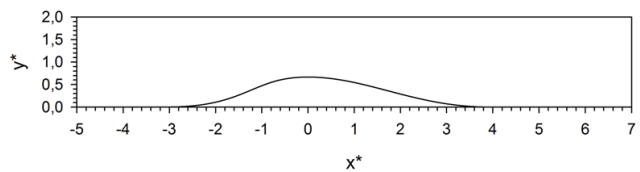


FIGURE 1 – Géométrie de l’obstacle considéré.

à grand angle d’attaque [6] et ainsi être représentatif des écoulements décollés rencontrés dans des applications industrielles aéronautiques. Le régime d’écoulement qui nous intéresse étant turbulent, il en résulte un décollement fortement instationnaire dont le bulbe de recirculation ne peut être défini qu’au sens statistique. On utilise pour les essais expérimentaux un canal hydrodynamique à retour, conçu pour fonctionner à basse vitesse et présentant une très faible intensité de turbulence (rapport de contraction du convergent supérieur à 25). Ce canal hydrodynamique est de type canal plan de hauteur $H = 20\text{mm}$ et de dimensions transversales $150 \times 20\text{mm}^2$ (rapport d’aspect de 7.5 : 1). Cette installation a déjà été utilisée récemment pour une étude sur la turbulence de paroi [4] avec un rapport d’aspect de 15 : 1. Ce rapport est considéré comme suffisant selon Dean [1], qui recommande 7 : 1, pour garantir la bidimensionnalité de l’écoulement. L’écoulement est également déclenché à l’entrée du canal par une barre de 1mm de diamètre. L’obstacle étudié, semblable à celui utilisé dans les travaux de Marquillie *et al.* [6] est monté sur la paroi inférieure du canal plan à 1250mm de l’entrée du canal ($62.5H$), longueur assurant un régime turbulent pleinement développé. La bosse a une hauteur h de 6.7 mm et une longueur caractéristique L de $10h$, elle est également instrumentée de 19 sondes électrochimiques affleurantes, de section circulaire de 0.2mm de diamètre positionnées sur son plan médian. Les nombres de Reynolds considérés seront définis par $Re_\tau = (H/2) \times u_\tau / \nu$ (aussi appelé nombre de Kármán) et les indices c et b désigneront respectivement des grandeurs prises au centre du canal (valeurs maximum) et dites débitantes (bulk). Le symbole \star fait référence à l’adimensionnement par $H/2$.

3 Résultats et discussion

3.1 Caractéristiques de l’écoulement amont

La majeure partie des publications sur les écoulements décollés/recollés s’intéresse aux propriétés de l’écoulement en aval du décollement. Toutefois, il est légitime de s’interroger quant au rôle des propriétés de l’écoulement en amont du décollement. Dans la littérature on trouve principalement deux cas de figure liés uniquement à la nature de l’écoulement, ceux à faible nombre de Reynolds sensibles à la couche limite amont et notamment au rapport H/h et ceux à haut nombre de Reynolds pouvant interagir avec les structures cohérentes. D’une façon générale, il est donc fort intéressant de bien connaître les paramètres pilotant l’écoulement incident avant de s’intéresser aux propriétés du décollement proprement dit. Des profils de vitesse ont donc été réalisés à 60mm en amont du sommet de la bosse en vue de caractériser les paramètres de l’écoulement incident.

Le système anémométrique utilisé dans cette étude est un système DANTEC FLOWLITE[®]. Le volume de mesure, obtenu avec une focale de 500 mm est de $0.19 \times 0.19 \times 3.19 \text{ mm}^3$. L'ensemencement est réalisé par l'introduction dans l'écoulement d'iriodine[®], délivrant ainsi des particules dont le diamètre est compris entre 2 et $15 \mu\text{m}$. L'erreur sur la mesure de vitesse est estimée inférieure à 0.5%. Les profils de vitesse amont ont été représentés (figure 2) et comparés favorablement au profil de vitesse obtenu numériquement par Marquillie *et al.* [6] pour un nombre de Kármán de 617. L'ensemble des données anémométriques a ensuite été analysé afin d'extraire les principales caractéristiques de l'écoulement incident (reportées dans la table 1). Il est à noter également que les coefficients de frottement déduits des profils de vitesse sont en bon accord avec la loi de frottement proposée par Dean [1]. Au vu des caractéristiques des profils de vitesse, l'écoulement peut être considéré comme turbulent pleinement développé en amont de la bosse.

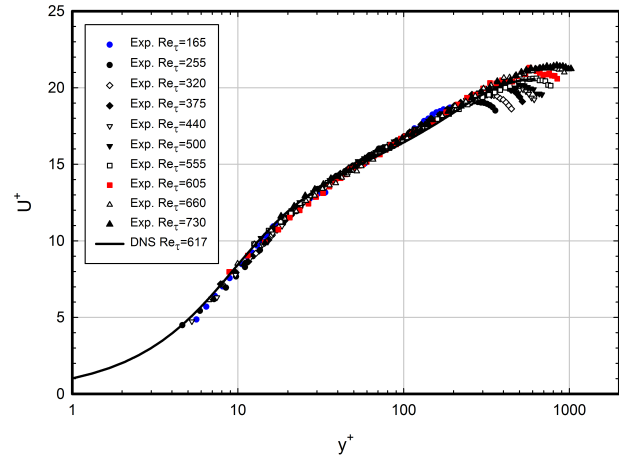


FIGURE 2 – Profils de vitesse amont expérimentaux et numérique (Marquillie *et al.* [6]) en variables internes.

$U_c (ms^{-1})$	$U_b (ms^{-1})$	$u_\tau (ms^{-1})$	$Re_c ((H/2)U_c/\nu)$	$Re_b (HU_b/\nu)$	Re_τ	$C_{fb} \times 10^3$	Symboles
0.36	0.29	0.0190	3130	5010	165	8.70	●
0.56	0.48	0.0295	4870	8330	255	7.59	●
0.72	0.62	0.0370	6295	10765	320	7.09	◇
0.88	0.76	0.0430	7680	13265	375	6.38	◆
1.02	0.89	0.0505	8870	15600	440	6.34	▽
1.16	1.01	0.0565	10090	17565	500	6.26	▼
1.32	1.15	0.0640	11480	20090	555	6.14	□
1.45	1.30	0.0695	12610	22575	605	5.74	■
1.61	1.43	0.0760	14000	24870	660	5.65	△
1.79	1.59	0.0837	15565	27650	730	5.54	▲

TABLE 1: Principaux paramètres de l'écoulement amont.

3.2 Effet Reynolds sur le décollement

Dans une première approche, nous avons effectué des visualisations par tranche (tomoscopie) en ensemencant le fluide avec des particules d'iriodine[®]. Ces particules sont ensuite éclairées par un plan laser (Laser Continu QUANTUM EXCEL[®], de longueur d'onde 532 nm). Les films sont acquis avec une caméra IMPERX[®] (IPX-VGA210) équipée d'une optique Nikon[®] (AF NIKKOR 50 mm f/1.8D) à une cadence de 100 imgs/s. Cette installation permet de suivre le déplacement des particules entraînées par le fluide dans ses mouvements et de mettre en évidence les zones de recirculation ou de plus faible vitesse. Ces visualisations ont été réalisées pour différents nombres de Kármán allant de 50 environ à 730 et sont représentées sur la figure 3 sous forme de clichés instantanés pris à un instant arbitrairement choisi dans chacun des films. On peut observer, dans un premier temps, pour des nombres de Kármán allant jusqu'à 165, une forte activité tourbillonnaire ainsi que la présence d'une zone de recirculation couvrant en partie la pente descendante de l'obstacle. Cette activité tourbillonnaire semble persister pour des nombres de Kármán plus élevés, mais celle-ci est moins facilement observable sur les visualisations. Ce décollement massif ainsi que la forte activité tourbillonnaire sont typiques des faibles nombres de Reynolds et ont été observés par de nombreux auteurs. Pour des nombres de Kármán compris entre 165 et 440, la zone décollée est toujours présente, mais tend à se réduire progressivement pour devenir inobservable sur les visualisations pour des nombres de Reynolds supérieurs à 500.

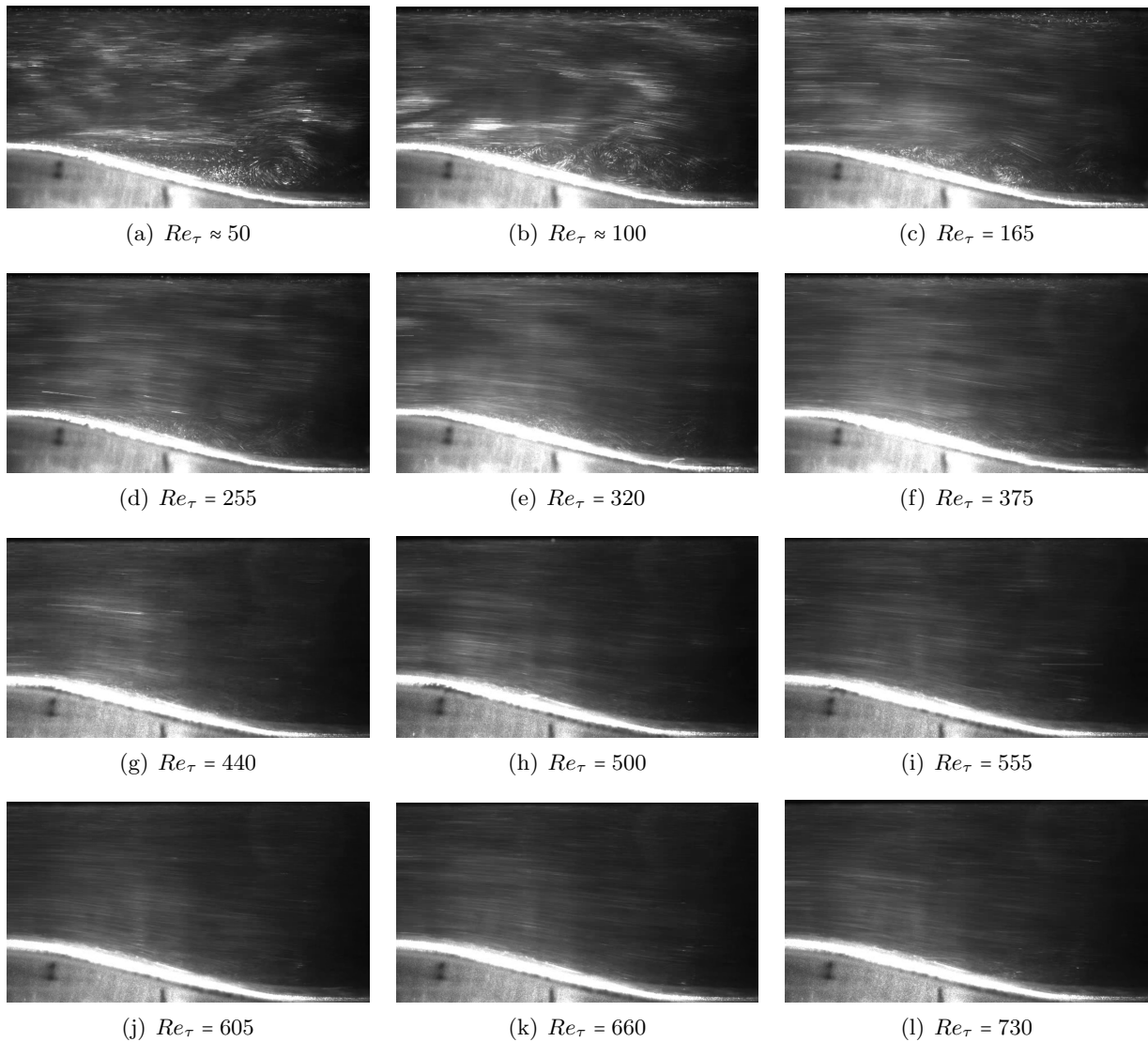


FIGURE 3 – Visualisations par tomoscopie laser pour la plage de nombres de Kármán allant de 50 à 730 (écoulement de gauche vers la droite).

On peut également noter un ralentissement, voire même un décollement sur la paroi opposée à l'obstacle pour des nombres de Kármán allant jusqu'à 165 (particulièrement marqué sur le cliché 3(c)). Ce phénomène est également mis en évidence par les simulations numériques de Marquillie *et al.* [6] où les auteurs notent une baisse significative du coefficient de frottement de la paroi opposée (en pointillés sur la figure 4(a)).

3.3 Analyse statistique de l'écoulement décollé

L'intérêt est ici porté sur la phénoménologie des instationnarités de l'écoulement décollé. La méthode électrochimique polarographique, dont une revue détaillée a été proposée par Hanratty et Cambell [3] est utilisée pour caractériser les fluctuations de frottement pariétal. La réponse en fréquence de cette méthode, basée sur les propriétés diffusionnelles d'un composé chimique en solution, dans le cas présent du ferri-ferrocyanure, doit cependant être corrigée lorsque les fluctuations deviennent importantes en vue de pallier le phénomène d'inertie de la couche limite de concentration (atténuation de l'amplitude des fluctuations du champ dynamique). Un algorithme semi-empirique [8] a été employé en première approche pour corriger la réponse en fréquence.

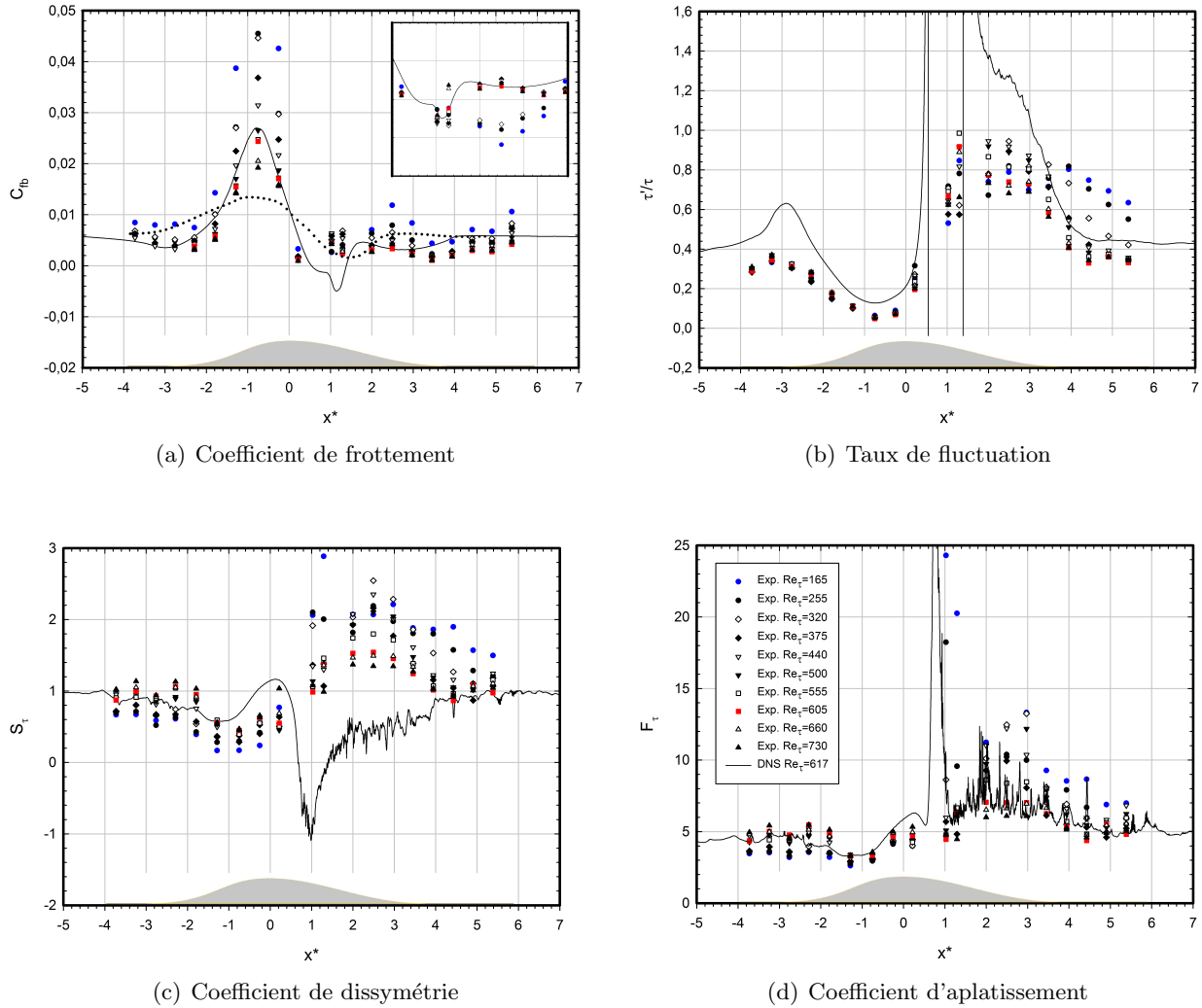


FIGURE 4 – Statistiques pariétales de frottement. En médaillon sur la figure 4(a), une spéculation sur le signe du coefficient de frottement basée sur les visualisations.

L'évolution des coefficients de frottement, mesurés expérimentalement le long du plan médian de la bosse, représentés figure 4(a), montrent un effet Reynolds significatif, notamment pour les faibles nombres de Kármán. Bien que les sondes électrochimiques installées (sondes simples) ne soient pas sensibles à la direction, l'évolution du coefficient de frottement prédite numériquement semble relativement conforme à celle mesurée pour un nombre de Kármán comparable. Dans ce cas la méthode polarographique n'est valide qu'en dehors du point de frottement nul, on ne présentera donc ici que la valeur absolue du frottement pariétal. Néanmoins, une spéculation sur le signe du coefficient de frottement basée sur nos visualisations est proposée en médaillon sur la figure 4(a) et devra par la suite être vérifiée par des mesures LDV et PIV complémentaires. Concernant le taux de fluctuation (figure 4(b)), un bon accord est là aussi observé avec la simulation, cependant on peut noter une sous estimation systématique du taux de fluctuation expérimental. Cette sous estimation peut être en partie expliquée par le fait qu'une méthode semi-empirique a été utilisée pour la correction de la réponse en fréquence et non une méthode de transfert de masse inverse [5], plus performante, mais également plus exigeante à mettre en œuvre. Les facteurs de dissymétrie et d'aplatissement (figures 4(c) et 4(d)) montrent également une bonne corrélation avec la simulation numérique et semblent moins affectés par l'atténuation des fluctuations de frottement pariétal. Cependant, pour la région amont au décollement, le facteur de dissymétrie s'écarte ostensiblement de la prédiction numérique, ce comportement peut

être expliqué par le fait que ce facteur est fortement sensible au signe des fluctuations de frottement dans cette région fortement instationnaire. On peut également noter pour ces derniers facteurs, tout comme pour le taux de fluctuation, une faible sensibilité au nombre de Kármán dans la région amont au décollement, contrairement à la région aval. Cet effet Reynolds en aval du décollement, s'étalant sur une longueur allant 2 à 4 H , est probablement associé à la zone de rattachement du bulbe, où les fluctuations présentent des amplitudes très importantes. Celles-ci peuvent être expliquées par le fait qu'en régime turbulent, l'écoulement de retour au voisinage du point de décollement est dû aux grosses structures qui fournissent l'énergie à l'écoulement de proche paroi. Les fluctuations de vitesse, ainsi que les fluctuations de frottement pariétal, dans la région de l'écoulement de retour peuvent donc devenir très importantes.

4 Conclusions

Nous avons étudié en écoulement confiné de type canal plan, l'évolution, en fonction du nombre de Reynolds, du décollement en aval d'une bosse ainsi que la phénoménologie instationnaire qui lui est associée. Les résultats expérimentaux se sont montrés en bon accord avec les prévisions numériques et ont mis en évidence une dépendance significative de la zone décollée au nombre de Reynolds. Cependant, des mesures anémométriques complémentaires sont encore nécessaires pour estimer quantitativement les dimensions de la bulle décollée. Cette étude sera également étendue à une configuration semi-confinée de type couche limite.

Ce travail est soutenu par les Instituts Carnot ARTS (projet CACOD), par le Campus International pour la Sécurité et l'Intermodalité des Transports (CISIT), la Région Nord-Pas-de-Calais, l'Union Européenne, la Direction de la Recherche, Enseignement Supérieur, Santé et Technologies de l'Information et de la Communication et le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS).

Références

- [1] Dean, B. 1978 Reynolds number dependence of skin friction and other bulk flow variables in two-dimensional rectangular duct flow. *J. Fluids Eng.* **100(2)** 215-224
- [2] Gad-el-Hak, M., Bushnell, D.M. 1991 Separation Control : Review. *J. Fluids Eng.* **113** 5-30
- [3] Hanratty, T.J., Cambell, J.A. 1983 Measurement of wall shear stress. *Fluid Mechanics Measurements*, ed. R.J. Goldstein, Hemisphere Publishing Co. 559-615
- [4] Keirsbulck, L., Labraga, L., Gad-el-Hak, M. 2012 Statistical properties of wall-shear-stress fluctuations in turbulent channel flows. *Int. J. Heat and Fluid Flow.* **37** 1-8
- [5] Mao, Z., Hanratty, T.J. 1991 Analysis of wall shear stress probes in large amplitude unsteady flows. *Int. J. Heat Mass Transfer* **34(1)** 281-290
- [6] Marquillie, M., Ehrenstein, U., Laval, J.-P. 2011 Instability of streaks in wall turbulence with adverse pressure gradient. *J. Fluid Mech.* **681** 205-240
- [7] Simpson, R.L. 1989 Turbulent boundary layer separation. *Ann. Rev. Fluid Mech.* **21** 205-234
- [8] Sololík, V., Wein, O., Čerák, J. 1959 Simulation measurement of film thickness and wall-shear stress in wavy flow of non-newtonian liquids. *Collection of Czechoslovak Chemical Communication* **52** 913-928
- [9] Song, S., Degraaff, D.B., Eaton, J.K. 2000 Experimental study of a separating, reattaching, and redeveloping flow over a smoothly contoured ramp. *Int. J. Heat and Fluid Flow* **21** 512-519
- [10] Xiaohua, W., Squires, K. 1998 Numerical investigation of the turbulent boundary layer over a bump. *J. Fluid Mech.* **362** 229-271