

Dépendance paramétrique de l'écoulement autour d'une marche montante à hauts nombres de Reynolds.

A. Graziani^{a,b}, M. Lippert^a, D. Uystepruyst^a, L. Keirsbulck^a

a.LAMIH UMR 8201, F-59313, Valenciennes, France. laurent.keirsbulck@univ-valenciennes.fr

b. Institut de Recherche Technologique RAILENIUM, F-59308, Famars, France.

anthony.graziani@railenium.eu

Résumé :

Cette communication s'intéresse à la dépendance des grandeurs pariétales d'un écoulement de marche montante à différents paramètres d'écoulements pour de hauts nombres de Reynolds. A l'aide de plusieurs séries de mesures du champ aérodynamique par vélocimétrie à image de particules (PIV) et de fluctuations de pression pariétale réalisées en soufflerie, la sensibilité des points de recollements situés en amont et en aval du bord d'attaque du modèle a été étudiée. Il en résulte qu'au delà d'un nombre de Reynolds critique, basé sur la hauteur de marche Re_h , le point de recollement en aval suit une corrélation logarithmique en fonction du rapport entre la hauteur de marche et l'épaisseur de couche limite incidente h/δ , et le rapport de contraction de la veine C_R . De plus, la dynamique in-stationnaire de l'écoulement a été étudiée au travers de l'analyse spectrale des fluctuations de pression pariétale, et montre un comportement auto-semblable en fonction des paramètres précédemment cités.

Abstract :

The sensitivity to several flow parameters on near wall quantities of the flow surrounding a forward facing step at high Reynolds number is experimentally investigated for 9 configurations. Particles image velocimetry PIV permitted to study the evolution of the reattachment points, located upstream and downstream the leading edge, through Reynolds number based on step height Re_H , constriction ratio C_R and step height to boundary layer thickness ratio h/δ . The results show a logarithmic correlation of the downstream recirculation length function of h/δ and C_R . In addition, the wall pressure signature of coherent structures was recovered using unsteady pressure transducers. It shows that the dimensionless frequency of both low and high frequency instabilities remains stable with the modification of flow parameters.

Mots clefs : Marche montante, paramétrique, PIV, pression pariétale, in-stationnaire.

1 Introduction

Depuis maintenant 10 ans, les autoroutes ferroviaires transportent des convois combinés de marchandises sur de très longues distances et notamment des semi-remorques sans tracteur. Ces dernières, en

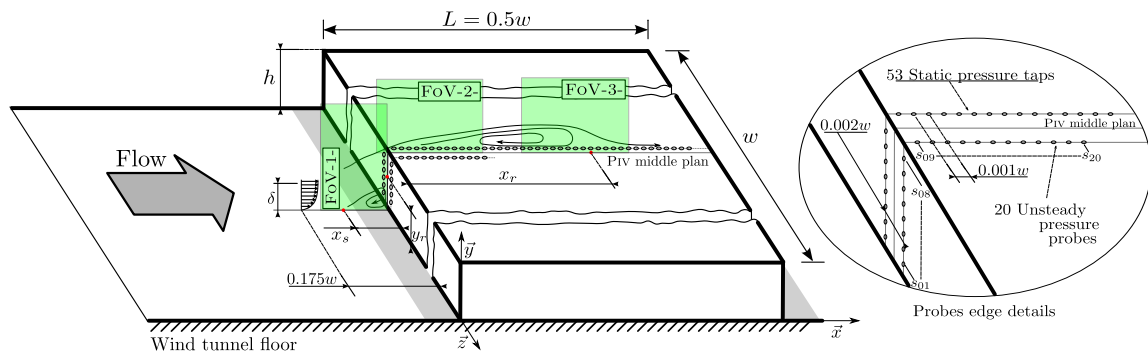


FIGURE 1 – Instrumentation et configuration de l'écoulement.

fonction de la répartition des wagons sur le convoi, peuvent être soumises à des vents relatifs induisant des décollements inertiels interagissant avec leurs parois bâchées. Les fluctuations du champ aérodynamique, provoquées par les décollements turbulents, sollicitent les bâches qui finissent par céder lors d'un évènement violent (croisement de train, entrée en tunnel, vent traversier) causant des incidents d'exploitation. D'un point de vue industriel, il est donc nécessaire de comprendre la formation de ces fluctuations de pression pariétale et de les maîtriser pour diminuer les risques d'arrachement de bâche. La caractérisation et le contrôle des écoulements décollés sont parmi les sujets de recherche possédant encore d'importants verrous scientifiques qu'il est nécessaire de débloquent pour concevoir les transports de demain. De par la complexité de ce type d'écoulement, il est courant de se rapprocher de configurations académiques, comme une marche descendante, un cylindre ou une cavité, avant d'étudier le comportement des écoulements autour de géométries industriels plus complexes. Dans ce contexte, l'étude de l'écoulement autour d'une marche montante s'avère particulièrement intéressante de par sa topologie à deux zones de recirculations ([6]) et sa dynamique fortement instationnaire ([5],[10], [14]), pouvant dépendre de nombreux paramètres ([3],[4],[8]). Cette communication va donc s'intéresser à la dépendance de l'écoulement autour d'une marche montante à plusieurs paramètres de l'écoulement, pour de hauts nombres de Reynolds, par l'intermédiaire de mesures expérimentales. La première partie se consacrera à la présentation des différents cas étudiés et du banc de mesure. La seconde partie, quant à elle, se concentrera sur la sensibilité des longueurs de recirculation, en amont et en aval du bord d'attaque de la marche, au nombre de Reynolds basé sur la hauteur de marche Re_H , au rapport de contraction $C_R = S_p/S_v$ (où S_p est la section de passage du fluide et S_v la section de la veine d'essais) et au rapport entre la hauteur de marche et l'épaisseur de couche limite incidente h/δ . Dans la dernière partie, l'influence des paramètres précédents sur la dynamique de l'écoulement sera étudiée par l'intermédiaire d'une analyse fréquentielle des fluctuations de pression pariétale. Dans la suite, toute grandeur indiquée $*$ est normalisée par rapport à la hauteur de marche, pour une longueur, ou à la vitesse extérieure de l'écoulement pour une vitesse et l'énergie cinétique turbulente.

2 Dispositif expérimental

Les mesures ont été réalisées dans la soufflerie du LAMIH pour neuf configurations de marches montantes. La veine d'essais, faite de polycarbonate pour permettre des accès optiques, et de dimension $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 10\text{ m}$, peut fonctionner à des vitesses comprises entre 0.5 et 60 m/s et possède un faible taux de turbulence en entrée (inférieur à 0.6%). La maquette a été montée sur l'une des parois latérale

TABLE 1 – Paramètres d'écoulement et longueurs caractéristiques moyennes.

Études	Amont			Marche Montante						
	U_∞ [m/s]	δ (mm)	Re_δ	h (mm)	Cr	h/δ	Re_h	y_r^*	x_r^*	Symboles
+ Présente étude	10	81.9	54625	166	0.92	2.026	110670	0.584	3.22	◆
				186	0.91	2.270	124000	0.575	3.30	◆
				206	0.90	2.514	137330	0.560	3.35	◇
	20	74.2	98980	166	0.92	2.236	221340	0.566	3.42	▼
				186	0.91	2.506	248000	0.554	3.44	▼
				206	0.90	2.775	274660	0.540	3.47	▽
	30	70.9	141795	166	0.92	2.341	331910	0.533	3.49	■
				186	0.91	2.623	372000	0.553	3.52	■
				206	0.90	2.905	412000	0.531	3.55	□

et s'étend sur toute la hauteur de la veine ($w = 2 m$). La hauteur de marche h peut prendre trois valeurs différentes, 166 mm, 186 mm, 206 mm afin de tester l'influence du rapport de contraction de la veine d'essai C_R et du ratio h/δ sur les grandeurs pariétales. La longueur de la maquette a été fixée à 1 m. Quelque soit la configuration, la géométrie de la maquette satisfait les critères $L^* > 4$ et $w^* > 9$ permettant de valider l'hypothèse d'un écoulement bidimensionnel isolé ([2]). Les mesures ont été réalisées pour trois vitesses de travail (10, 20 et 30 m/s) pour les trois configurations décrites précédemment portant à neuf le nombre de cas d'étude. L'ensemble des configurations et leurs paramètres associés sont répertoriés dans le tableau 1. Dans la suite, il sera noté U et V les composantes du champ de vitesse dans les direction \vec{x} et \vec{y} (voir figure 1), respectivement direction axiale et radiale de l'écoulement.

La couche limite incidente a été mesurée à l'aide d'un tube de Pitot à 350 mm en amont des maquettes pour les trois vitesses de travail. Le profile correspond à une loi puissance en $1/\gamma^{ieme}$ pour les trois vitesses de travail, ce qui traduit une couche limite turbulente pleinement développée en amont de la marche. Pour chacune des neuf configurations, le champ de vitesse autour du modèle a été mesuré par Piv standard 2D2C en trois zones (FoV-1-, FoV-2- et FoV-3-) du plan central du modèle, comme indiqué sur la figure 1, afin de capturer le comportement de l'écoulement autour du bord d'attaque ainsi que la position des deux points de recollement situés respectivement sur la face frontale et la face supérieure de la marche. Un laser Nd :Yag de longueur d'onde 532 nm génère une nappe de 2 mm d'épaisseur dans le plan centrale de la marche à une fréquence $f_{Piv} = 7 Hz$, illuminant des particules d'huiles de 10 μm de diamètre. Le déplacement de ces traceurs est enregistré par trois caméras de type PowerView de résolution 2048×2048 pixels. Pour chaque champ de vision, 2000 paires d'images ont été capturées et analysées par cross-corrélation direct sur des cellules de 16×16 pixels avec 50% de recouvrement grâce au logiciel INSIGHT 4G, commercialisé par TSI. Les 2000 champs de vecteurs ainsi calculés ont une résolution spatiale finale $\Delta x = \Delta y \simeq 1mm$.

Parallèlement aux mesures de champs de vitesses, la distribution de pression pariétale a également été mesurée pour chacune des configurations. Une série de 20 capteurs de pression instationnaires de type KULITE-XCP-062 ont été positionnés affleurant à la face frontale (8 capteurs) et à la face supérieure (12 capteurs) et espacés de 20 mm les uns des autres. Les capteurs sont raccordés à deux systèmes d'acquisitions DEWESOFT-STG+, lesquels effectuant une auto-calibration des sondes et pouvant filtrer en temps réel. La fréquence d'échantillonnage a été fixée à $f_s = 10 kHz$ afin de capturer l'ensemble des phénomènes dynamiques mis en jeu, et un filtre passe bas type Bessel d'ordre 8 et de fréquence de coupure $f_c = 3 kHz$ a été appliqué pour retirer le bruit de mesure. Les capteurs ont été positionnés dans un plan décalé de 2 mm du plan laser afin d'éviter les interférences. La figure 1 résume l'instrumentation des configurations d'études.

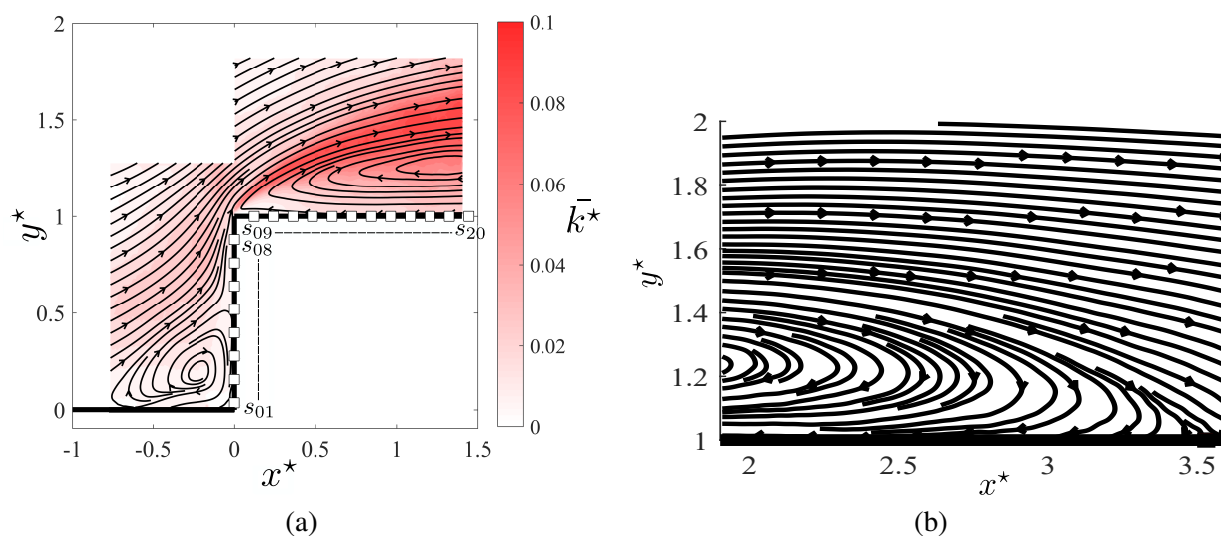


FIGURE 2 – Contour d'énergie cinétique turbulente partielle et lignes de courants moyennes pour $Re_\delta=98980$ et $h/\delta=2.236$: (a) : FoV-1+2-, (b) : FoV-3-.

2.1 Écoulements moyens

Dans cette partie, le comportement moyen des zones de recirculations formées en amont et en aval du bord d'attaque de la marche est étudié au travers de l'évolution de la longueur de recollement sur les faces frontale et supérieure, respectivement notées y_r^* et x_r^* . Pour chaque cas, le champ aérodynamique moyen a été calculé pour les trois zones de mesures à partir des champs instantanés issus de la PIV. La figure 2 montre les lignes de courant moyennes pour un nombre de Reynolds, basé sur l'épaisseur de couche limite incidente $Re_\delta = 98980$ et un ratio $h/\delta = 2.236$. Les champs FoV-1- et FoV-2- ont été assemblés pour former un champ englobant le bord d'attaque du modèle présenté sur la figure 2 (a). Le champ assemblé permet d'observer la forme du bulbe de recirculation au pied de la marche ainsi que son influence sur les lignes de courant incidentes, déviant l'écoulement sur le bord d'attaque du modèle. L'écoulement ainsi dévié est cisailé par le bord d'attaque, formant en moyenne la zone de recirculation en aval. Le contour d'énergie cinétique turbulente partielle, $\bar{k}^* = \sqrt{u'^2 + v'^2}/U_\infty^2$ a également été tracé et montre que la majorité de l'énergie des fluctuations se trouve dans la couche cisailée du décollement inertiel. La figure 2 (b) montre que le recollement moyen du bulbe aval se situe au delà de $x^* = 3$.

Dans chacune des configurations, les grandeurs y_r^* et x_r^* ont été déterminées en localisant le point au plus proche de la paroi où respectivement les composantes V et U s'annulaient en changeant de signe. Les valeurs ont été répertoriées dans le tableau 1, et comparées avec les grandeurs de la littérature sur la figure 3 en ce qui concerne la longueur de recirculation en aval.

La figure 3 (a) montre l'évolution de x_r^* en fonction du nombre de Reynolds Re_h . Le graphique montre que la longueur de recirculation augmente avec le nombre de Reynolds et le rapport de contraction C_R , tandis qu'elle tend à diminuer avec l'augmentation du paramètre h/δ . De plus, au delà du nombre de Reynolds critique $Re_c \simeq 8500$, précédemment mis en évidence dans les travaux de Sherry et al [13], le point de recollement ne dépend plus que des deux précédentes variables et leurs influences respectives ont été analysées au travers de la figure 3 (b). On constate sur ce graphique qu'une tendance linéaire de l'évolution de x_r^* en fonction de $\log(h/\delta)$ se dégage, aboutissant à la corrélation suivante :

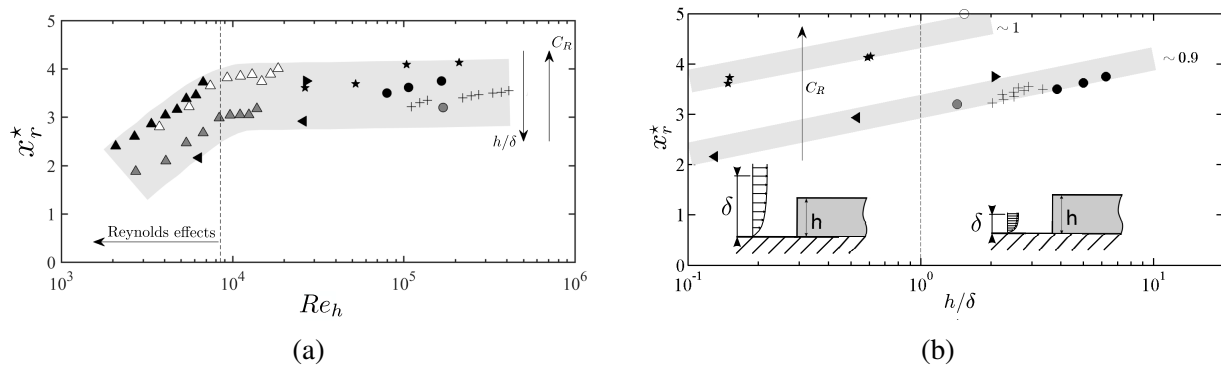


FIGURE 3 – Longueur de recirculation aval en fonction du nombre de Reynolds (a) et de h/δ (b) + Présente étude, \blacktriangle \blacktriangle \triangle Sherry *et al.* [13], \blacktriangleleft Ji et Wang [9], \bullet Leclercq *et al.* [12], \blacktriangleright Bergeles *et al.* [2], \star Awasthi *et al.* [1], \bullet Largeau et Moriniere [11].

$$x_r^* = a \cdot \log(h/\delta) + f(C_R) \quad (1)$$

où a est un coefficient restant indéterminé par manque de données. Ce dernier peut également être dépendant d'autres paramètres de l'écoulement ou de la rugosité de surface du modèle.

2.2 Instabilités dynamiques

Cette section s'intéresse aux instabilités dynamiques se formant en aval du bord d'attaque de la marche par analyse spectrale des fluctuations de pression pariétale. La figure 4 montre la densité de puissance spectrale des capteurs pour le cas $Re_\delta = 141795$ et $h/\delta = 2.905$. On observe tout d'abord l'apparition d'une instabilité haute fréquence large bande, se propageant du bord d'attaque du modèle vers l'aval du modèle, convergeant vers un nombre de Strouhal basé sur la hauteur de marche $S_t = f \cdot H/U_\infty \simeq 0.15$. Ce comportement, corroboré par la littérature ([14]), est caractéristique d'une instabilité convective de Kelvin-Helmholtz naissant au bord d'attaque de la marche, générant des structures tourbillonnaires qui sont éjectées en aval, à la fréquence sans dimension $S_t \simeq 0.15$, une fois saturées. De plus, il est possible d'observer la présence d'une instabilité basse fréquence large bande, naissant en amont du modèle et détecté par les capteurs situés sur la face supérieure à un nombre de Strouhal $S_t \simeq 0.08$. Ce comportement basse fréquence est souvent associé au battement de la couche de cisaillement aval mais peut se révéler plus complexe selon les configurations, de par la proximité des deux zones de recirculations pouvant induire des interactions entre ces zones, ainsi que par la présence de basses fréquences bien en amont du modèle ([7]).

Pour chacune des configurations étudiées, les fréquences sans dimension pour les deux phénomènes ont été relevées afin de quantifier leurs sensibilités aux paramètres de l'écoulement. Ces valeurs sont représentées sur la figure 5. L'évolution de la basse fréquence en fonction du paramètre h/δ est présentée sur la courbe (a). Bien que dispersées, les fréquences sans dimensions restent du même ordre de grandeur et centrées autour de $S_t \simeq 0.08$ révélant une indépendance à h/δ . Sur la figure (b), l'évolution de l'instabilité convective en fonction de x^* a été tracée pour chaque cas d'étude. On constate que les courbes sont auto-semblables et convergent d'autant plus vite vers la fréquence de lâcher de tourbillons, $S_t \simeq 0.15$, à mesure que le ratio h/δ augmente.

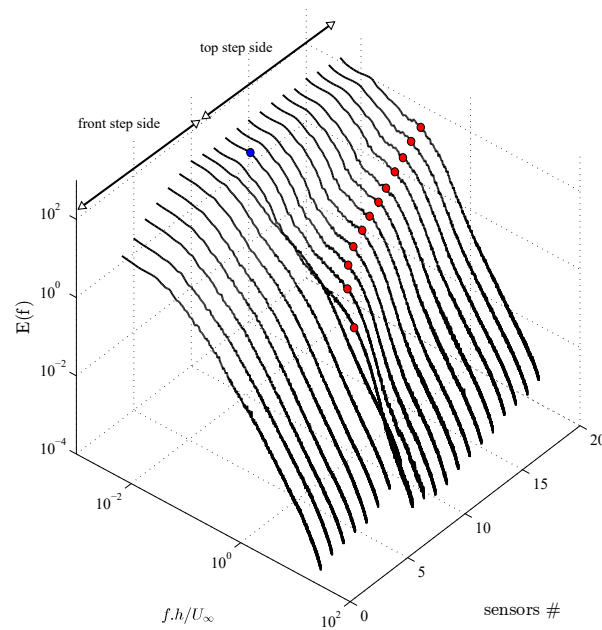


FIGURE 4 – Densité de puissance spectrale des fluctuations pariétales de pression pour le cas $Re_\delta = 141795$ and $h/\delta = 2.905$. Le cercle bleu pointe sur une basse fréquence constante tandis que les cercles rouges montrent une instabilité convective haute fréquence.

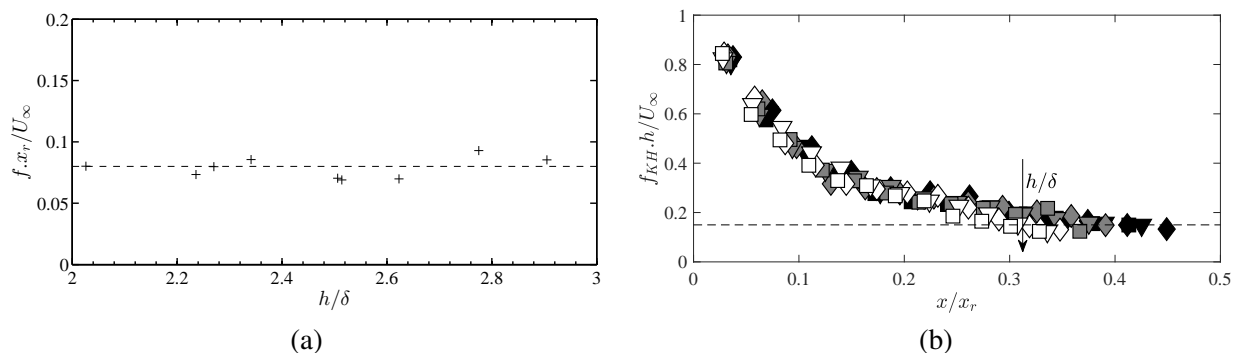


FIGURE 5 – Fréquences sans dimensions pour tous les cas d'études : (a) basses fréquences, (b) hautes fréquences.

3 Conclusions

Dans cette communication, la sensibilité de l'écoulement autour d'une marche montante à différents paramètres tels que le nombre de Reynolds, le rapport de contraction $C_R = S_p/S_v$ et le rapport entre la hauteur de marche et l'épaisseur de couche limite incidente a été étudiée expérimentalement. Neuf configurations différentes ont été étudiées par l'intermédiaire d'essais en soufflerie, incluant des mesures de champs aérodynamiques par PIV et de fluctuations de pression pariétale à l'aide de sondes instationnaires. L'analyse des longueurs de recirculations moyennes en amont et en aval du bord d'attaque du modèle a permis, grâce à un croisement avec les données issues de la littérature, de mettre en évidence une corrélation logarithmique avec les ratios h/δ et C_R . En revanche, la dynamique de l'écoulement en proche paroi semble plus robuste à ces paramètres de par la constance des fréquences sans dimension relevées par les capteurs de pression, aussi bien pour le phénomène de battement de la couche cisailée à basse fréquence, que pour l'instabilité convective de Kelvin-Helmoltz et sa saturation en lâcher de tourbillons à plus haute fréquence.

Références

- [1] **Awasthi M. ; Devenport J. ; Glegg S.A.L. ; Forest J.B.** (2014) Pressure fluctuations produced by forward steps immersed in a turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*. **756**, 384-421.
- [2] **Bergeles G. ; Athanassiadis N.** (1983) The flow past a surface-mounted obstacle. *Journal of Fluids Engineering*. **105**, 461-463.
- [3] **Castro I.** (1979) Relaxing wakes behind surface-mounted obstacles in rough wall boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*. **93**, 631-659.
- [4] **Castro I. ; Dianat M.** (1983) Surface flow patterns on rectangular bodies in thick boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. **11**, 107-119.
- [5] **Cherry N.J. ; Hillier R. ; Latour M.E.** (1985) Unsteady measurements in a separated and reattaching flow. *Journal of Fluid Mechanics*. **144**, 13-46.
- [6] **Eaton J. ; Johnston J. ;** (1981) A review of research on subsonic turbulent flow reattachment. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*. **19**, 1093-1100.
- [7] **Farabee M. ; Casarella M.J.** (1986) Measurements of fluctuating wall pressure for separated/reattached boundary layer flows. *ASME J. Vib., Acoust., Stress, Reliab. Des.* **108**, 301.
- [8] **Hattori H. ; Nagano Y.** (2010) Investigation of turbulent boundary layer over forward-facing step via direct numerical simulation. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. **31**, 284-294.
- [9] **Ji M. ; Wang M.** (2012) Surface pressure fluctuations on steps immersed in turbulent boundary layers. *Journal of Fluid Mechanics*. **712**, 471-504.
- [10] **Kiya M. ; Sasaki K.** (1985) Structure of large scale vortices and unsteady reverse flow in the reattaching zone of a turbulent separation bubble. *Journal of Fluid Mechanics*. **154**, 463-491.
- [11] **Largeau J. ; Moriniere V.** (2007) Wall pressure fluctuations and topology in separated flows over a forward facing step. *Exp. in Fluids*. **42**, 21-40.
- [12] **Leclercq D. ; Jaob M. ; Louisot A. ; Talotte C.** (2001) Forward-Backward facing step pair : aerodynamic flow wall pressure and acoustic characterisation. *Proceedings of the Seventh AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. **1249**, 075113-1-075113-13.
- [13] **Sherry M. ; Lo Jacono D. ; Sheridan J.** (2010) An experimental investigation of the recirculation zone formed downstream of a forward facing step. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. **98**, 888-894.
- [14] **Tenaud C. ; Fraigneau Y. ; Daru V.** (2011) Numerical simulation of the turbulent separation reattachment flow around a thick flat plate. *Journal of Physics : Conference series*, **318**, 1-10.