

Mesure du frottement pariétal instationnaire autour d'un corps épais 3D par méthode électrochimique

G. FOURRIÉ, D. BOUSSEMARY, L. KEIRSBULCK, L. LABRAGA

Univ Lille Nord de France, 59000 LILLE, FRANCE
UVHC, TEMPO, 59313 VALENCIENNES, FRANCE

Résumé :

Notre étude expérimentale s'intéresse à l'écoulement autour d'un modèle générique de véhicule automobile. Cet écoulement présente notamment une forte interaction entre structures tourbillonnaires à proximité de la paroi de la lunette arrière. Par l'utilisation de la méthode polarographique, permettant de mesurer directement le frottement pariétal instationnaire, cette étude se propose d'approfondir la compréhension de ce phénomène d'interaction. Nous mettons en évidence l'effet prépondérant des structures tourbillonnaires longitudinales ainsi que différents phénomènes participant à la dynamique de cette interaction.

Abstract :

Our experimental study focuses on the flow around a simplified automotive bluff-body. This flow is notably characterized by a strong interaction between vortex structures near the wall of the rear window. With the use of the polarographic method, allowing the direct measurement of the unsteady wall shear-stress, this study intends to improve the understanding of this interaction phenomenon. We highlight the predominant effect of the longitudinal vortices and different phenomena involved in the dynamics of this interaction.

Mots clefs : interaction tourbillonnaire, frottement pariétal instationnaire, méthode polarographique, corps épais 3D

1 Introduction

La géométrie présentée dans cette étude consiste en un corps épais de faible allongement, défini par Ahmed *et al.* [1], modélisant un véhicule automobile avec hayon arrière, et permettant de s'intéresser en particulier à l'écoulement autour de la partie arrière du véhicule. La configuration utilisée ici présente une lunette arrière inclinée à 25°. Cette géométrie est présentée dans la figure 1.

De nombreux auteurs se sont intéressés à la caractérisation aérodynamique de ce modèle générique de véhicule (*e.g.* Gilliéron et Chometon [2], Lienhart *et al.* [3], Krajnović et Davidson [4]), notamment pour les besoins de l'industrie automobile afin de mieux comprendre et contrôler l'écoulement autour des véhicules de type fastback (hayon incliné et culot droit, avec coffre intégré) (*e.g.* Gilliéron et Kourta [5], Fourrié *et al.* [6], Aider *et al.* [7]). Du fait de sa complexité, l'écoulement autour de la partie arrière de cette géométrie est également utilisé comme cas test pour la validation de modèles numériques (*e.g.* Guilmineau [8], Fares [9]). Cet écoulement présente en effet différentes structures tourbillonnaires se développant autour de la géométrie et interagissant entre elles, comme représenté sur la figure 2 : deux structures tourbillonnaires contrarotatives se développent à l'aval du culot du corps ; une zone décollée prend naissance sur l'arête supérieure de la lunette arrière et vient recoller sur la lunette formant ainsi un bulbe décollé ; des structures tourbillonnaires longitudinales contrarotatives se développent le long des arêtes latérales de la lunette arrière ; le tout s'accompagne de détachements tourbillonnaires, notamment issus des structures tourbillonnaires transversales contrarotatives de culot.

Quelques auteurs, notamment Spohn et Gilliéron [10], se sont en outre intéressés qualitativement aux interactions tourbillonnaires présentes entre les différentes structures, et notamment entre la zone décollée sur la lunette et les structures tourbillonnaires longitudinales se développant à ses abords. Ces structures longitudinales, en se développant, viennent plaquer le bulbe décollé contre la lunette arrière, il en résulte donc une forte interdépendance dans le développement et la dynamique de ces structures.

Nous nous proposons ici d'approfondir la caractérisation des structures présentes à proximité de la paroi de la lunette arrière du modèle, et de leurs interactions, par mesure directe du frottement pariétal instationnaire sur la lunette arrière par le biais de la méthode de mesure polarographique en canal hydrodynamique.

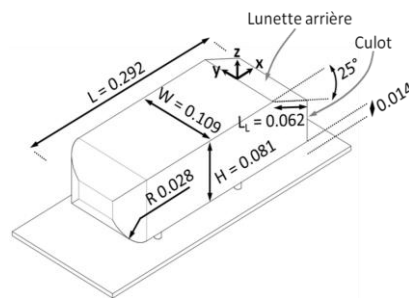


FIG. 1 – Modèle de Ahmed, d'après Ahmed *et al.* [1], avec lunette arrière inclinée à 25°, échelle 0.28, les dimensions sont en mètres. L'écoulement amont est dirigé suivant la direction x.

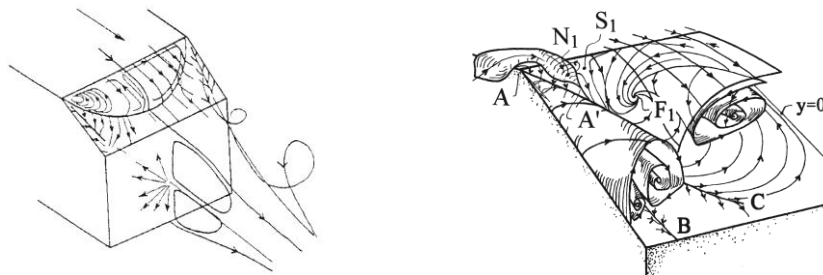


FIG. 2 – Représentations schématiques de la topologie de l'écoulement à l'arrière du modèle. Gauche : sillage, d'après Gilliéron et Chometon [2]. Droite : interaction entre le bulbe décollé et la structure tourbillonnaire longitudinale, d'après Spohn et Gilliéron [10].

2 Dispositif expérimental

L'étude a été réalisée dans le canal hydrodynamique polarographique du laboratoire TEMPO de l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.

2.1 Conditions et moyen d'essai

La maquette d'essai utilisée présente les caractéristiques géométriques définies dans la figure 1. Celle-ci repose sur un profil d'aile de type NACA 0018, le but étant de minimiser l'influence du support sur l'écoulement, tout en permettant le passage des connectiques nécessaires à l'instrumentation de la maquette.

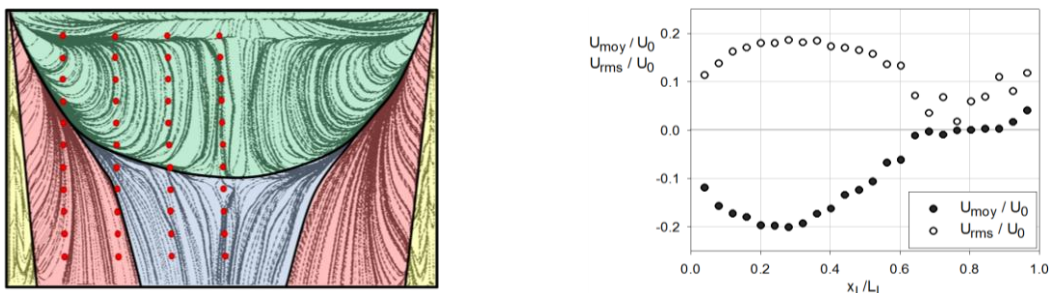


FIG 3 – Gauche : positions des sondes polarographiques (points rouges), lignes de frottement moyennes par LES (lignes grises), d'après Krajnović et Davidson [4], contours des traces des différentes structures tourbillonnaires impactant la paroi de la lunette (lignes noires). Droite : profils de moyennes et d'écart-types de vitesse sur une ligne parallèle à la ligne médiane de la lunette, à 0.1 mm à la verticale de la lunette, par vélocimétrie laser Doppler. La variable x_L est l'abscisse curviligne attachée à la lunette.

La veine d'essai du canal hydrodynamique polarographique a une section de 0.3×0.3 m². Le taux de turbulence au centre de la veine d'essai sans maquette est inférieur à 1.5%. Le taux d'obstruction dû à la présence de la maquette est de 10%. La vitesse de l'écoulement amont est de 3 m/s, résultant en un nombre de Reynolds, basé sur la hauteur du modèle, Re_H , de 2.4×10^5 .

La maquette est instrumentée avec des sondes polarographiques, comme présenté dans la figure 3. Les lignes de frottement moyennes présentées sur cette figure sont déterminées par Krajnović et Davidson [4] par simulation aux grandes échelles, pour un nombre de Reynolds similaire ($Re_H=2 \times 10^5$). Les zones d'impact des différentes structures tourbillonnaires sur la lunette sont également représentées : le bulbe décollé issu de l'arête supérieure de la lunette (en vert), les structures longitudinales principales (en rouge) et secondaires (en jaune) se développant le long des arêtes latérales de la lunette, ainsi que la zone à l'aval du bulbe décollé (en bleu), située entre les structures tourbillonnaires longitudinales. La cohérence de la longueur moyenne de la zone de recirculation, dans le plan médian, observée dans notre cas et sur les lignes de frottement proposées par Krajnović et Davidson [4] a été vérifiée (figure 3).

2.2 Moyens de mesure

Les mesures de frottement pariétal instationnaire sont réalisées par méthode électrochimique polarographique (un descriptif de la méthode est proposé par Hanratty et Campbell [11]). Cette méthode exploite les propriétés diffusionnelles de certains composés chimiques en solution pour déterminer le gradient de vitesse dans un liquide en mouvement à proximité d'une paroi. La solution électrolytique utilisée est une solution aqueuse de ferri-ferrocyanure de potassium avec une concentration de 10 mol/m^3 et de sulfate de potassium en excès. La paroi de la lunette arrière de la maquette est instrumentée avec 44 sondes de platine, le diamètre moyen de ces sondes est de 0.22 mm. Leur implantation est faite selon quatre lignes situées en $y/W=0.000, 0.125, 0.250$ et 0.375 , comme décrit sur la figure 3. La mesure du micro-courant, induit par la méthode, pour chaque sonde, nous permet de déterminer le frottement pariétal instationnaire. L'acquisition est réalisée sur 10^6 échantillons, à une fréquence de 1kHz, avec un filtre passe-bas à 500Hz. La réponse en fréquence des sondes électrochimiques a été corrigée directement dans le domaine temporel (Sobolík *et al.* [12]) en dehors des régions où le frottement est nul. Une correction a été appliquée pour minimiser les effets de non uniformité de l'écoulement sur la sonde dans le sens transverse pour ce nombre de Reynolds élevé (Mitchell et Hanratty [13]).

La vélocimétrie laser Doppler (LDV) est également employée ici. Le volume de mesure est d'environ $0.12 \times 0.12 \times 2.5 \text{ mm}^3$. L'ensemencement de l'écoulement est réalisé à l'aide de particules d'iriodine dont le diamètre moyen est inférieur à $10 \mu\text{m}$.

3 Résultats

3.1 Analyse statistique du frottement pariétal

Dans un premier temps, nous présentons les cartographies du frottement pariétal moyen et de sa fluctuation sur la lunette arrière (figure 4). Le champ total est déduit par symétrie.

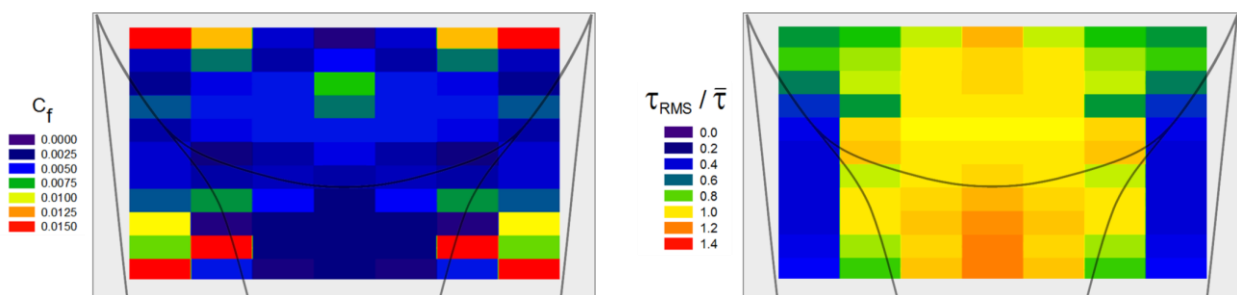


FIG 4 – Gauche : cartographie de coefficient de frottement. Droite : cartographie de fluctuation locale de frottement. Les limites des principales structures tourbillonnaires observées sur la paroi de la lunette arrière dans la figure 3 sont reportées en traits continus.

Nous retrouvons, sur ces cartographies, les limites des zones d'impact des différentes structures tourbillonnaires présentes sur la paroi de la lunette arrière. Le frottement moyen est particulièrement élevé au sein des zones d'impact des structures longitudinales et du bulbe décollé. La zone à l'aval du bulbe se caractérise quant à elle par des valeurs de frottement moyen plus faibles que sur le reste de la lunette.

Concernant les fluctuations locales, nous observons un découpage similaire des structures à la paroi. Dans la zone à l'aval du bulbe, ces fluctuations sont particulièrement importantes ; cette région est en effet soumise aux passages de détachements tourbillonnaires. Les fluctuations dans les zones correspondant aux structures

tourbillonnaires longitudinales sont moins intenses. Les fluctuations des limites latérales du bulbe, en contact avec les structures longitudinales, s'avèrent faibles, relativement au reste du bulbe décollé. L'intensité des structures tourbillonnaires longitudinales semble donc limiter les fluctuations latérales du bulbe.

3.2 Analyse des instationnarités sur la lunette arrière

Des spectres des signaux de frottement pariétaux ont permis de mettre en évidence une partie des fréquences caractéristiques de l'écoulement (figure 5, gauche). Nous présentons ces fréquences sous forme de nombre de Strouhal basé sur le maître-couple du modèle et la vitesse de l'écoulement extérieur, noté St_A . Sur la ligne médiane, $y/W=0$, ils révèlent la présence à l'intérieur du bulbe décollé de fréquences caractéristiques adimensionnées situées autour de 0.23. Cette présence n'est pas marquée en dehors du bulbe. On retrouve cette fréquence sur les sondes des autres lignes situées à l'intérieur du bulbe. Une fréquence comparable est également décelée dans le sillage du corps par anémométrie LDV, à l'aval de celui-ci, à hauteur de la lunette arrière. Cette fréquence est identifiable à celle observée par Kiya et Sasaki [14] dans le cas d'un bulbe de recirculation 2D, ils associent ce phénomène au battement de la structure décollée au-dessus de la paroi. Récemment, Thacker [15] a également observé la présence de cette fréquence caractéristique au niveau de la lunette arrière d'un modèle géométrique similaire à celui utilisé ici.

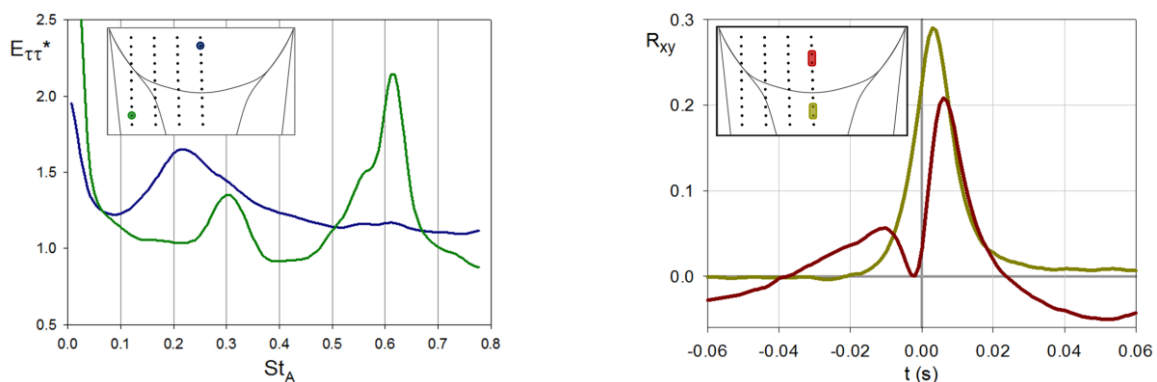


FIG 5 – Gauche : exemples de densités spectrales de puissance du frottement pariétal adimensionnées.

Droite : exemples de corrélations entre sondes successives de la ligne médiane de la lunette.

Les positions des sondes considérées sont présentées sur une représentation de la lunette exposant les limites des principales structures impactant la paroi.

On observe également, sur les sondes placées dans la partie latérale du bulbe, l'émergence de fréquences situées autour de 0.3 et 0.62. Ces dernières fréquences s'avèrent particulièrement marquées sur les sondes situées dans la région d'impact des structures tourbillonnaires longitudinales, elles semblent donc liées à ces structures longitudinales ; elles sont également observées sur des sondes placées sur le culot du corps, sur toute la largeur de celui-ci. Sims-Williams [16] observe également une fréquence comparable dans le sillage du corps, en périphérie de la structure tourbillonnaire longitudinale, par anémométrie à fil chaud. En couplant cette mesure à des mesures de pressions totales dans le sillage, il associe cette fréquence caractéristique à la variation périodique de l'intensité des structures longitudinales.

Des intercorrélations entre sondes successives montrent l'existence de doubles pics entre les sondes situées à l'intérieur du bulbe décollé (figure 5, droite), l'un situé à un temps positif et l'autre à un temps négatif. À partir de ces temps, nous déterminons les vitesses d'advection des structures dans le sens direct et dans le sens de la recirculation. Sur la ligne médiane, ces vitesses d'advection sont de l'ordre de $0.36 \times U_0$ à l'intérieur du bulbe, et de l'ordre de $0.52 \times U_0$ à l'extérieur. Ces vitesses d'advection correspondent à $7 \times U\tau$ à l'intérieur du bulbe, et $14 \times U\tau$ à l'extérieur, correspondant alors à la valeur rencontrée classiquement dans le cadre d'un écoulement turbulent développé à proximité d'une paroi (e.g. Khoo *et al.* [17]), $U\tau$ étant la vitesse de frottement. Un temps caractéristique est également identifié entre les minima de corrélation observés à l'intérieur du bulbe. Ce temps correspond à la fréquence adimensionnée St_A de 0.23 relevée précédemment.

Des moyennes conditionnelles ont également été réalisées, l'identification des événements cohérents étant effectuée avec la méthode introduite par Luchik et Tiederman [18], basée sur la détection de seuils du signal d'une sonde de référence. Un exemple de traitement par cette méthode est présenté en figure 6. Ces traitements des signaux de frottement mettent ici en évidence l'existence de décalages temporels dans

l'écoulement liés à la dynamique des attachements ou impacts (événements positifs) et détachements (événements négatifs) des structures tourbillonnaires à la paroi.

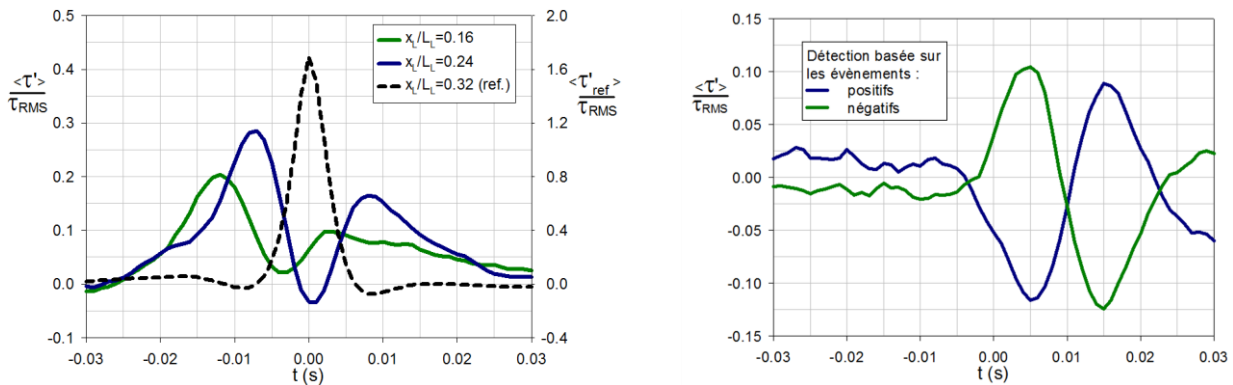


FIG 6 – Exemples de moyennes conditionnelles des sondes sur la ligne médiane de la lunette.

Gauche : région interne du bulbe décollé, la sonde référence étant placée à l'intérieur du bulbe.

Droite : la sonde de mesure est placée hors du bulbe ($x_1/L_1=0.65$), la référence étant placée à l'intérieur du bulbe ($x_1/L_1=0.32$).

Une périodicité d'événements positifs apparaît dans la zone interne du bulbe décollé, figure 6 (gauche), non détectée en dehors de celui-ci, autour d'une fréquence adimensionnée de 2, pouvant ainsi être reliée à la dynamique propre du bulbe.

Nous identifions également sur la ligne médiane la présence d'alternances caractéristiques d'événements positifs et négatifs entre une sonde référence placée à l'intérieur du bulbe décollé et les signaux relevés dans la zone à l'aval du bulbe, correspondant à l'émission de structures tourbillonnaires issues de la zone de recirculation vers l'aval, figure 6 (droite). Les fréquences adimensionnées attachées à ces phénomènes d'émissions de structures sont de l'ordre de $St_A=1.4$. La présence de cette émission de structures transverses issues du bulbe décollé a précédemment été observée numériquement par Krajnović et Davidson [19].

4 Conclusion

La méthode polarographique utilisée ici a permis l'étude de la dynamique des structures tourbillonnaires présentes à proximité de la paroi de la lunette arrière d'un modèle générique de véhicule. Les phénomènes mis en évidence participent en grande partie à la complexité de l'écoulement considéré.

Nous identifions différentes caractéristiques propres au bulbe décollé sur la lunette :

- il est soumis à un mouvement de battement au dessus de la lunette se produisant à une fréquence adimensionnée St_A , basée sur le maître-couple du corps et la vitesse de l'écoulement extérieur, de 0.23 ;
- une fréquence réduite située autour de $St_A=2$ est détectée en son sein ;
- des structures tourbillonnaires sont émises du bulbe vers l'aval à la fréquence réduite de $St_A=1.4$.

Les structures tourbillonnaires longitudinales se développant sur les arêtes latérales de la lunette s'avèrent fortement impliquées dans la dynamique instationnaire de l'écoulement :

- ces structures longitudinales induisent des fréquences réduites autour de $St_A=0.3$ et 0.62 perceptibles dans leur zone d'impact à la paroi, mais également sur le haut du culot du corps ainsi qu'à l'intérieur du bulbe décollé;
- ces structures longitudinales, du fait de leur forte interaction avec le bulbe, tendent à limiter les fluctuations de ce dernier dans le sens transverse.

La forte interaction existant entre les structures longitudinales et le bulbe décollé nous indique qu'il est essentiel de prendre en compte l'écoulement dans sa globalité, notamment pour la réalisation de stratégies de contrôle efficaces de l'écoulement autour de cette géométrie en vue d'en réduire la traînée aérodynamique.

Remerciements

Le présent travail de recherche a été financé par le Campus International sur la Sécurité et l'Intermodalité des Transports, la Région Nord-Pas-de-Calais, la Communauté Européenne, la Délégation Régionale à la Recherche et à la Technologie, le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche et le Centre National de la Recherche Scientifique. Les auteurs remercient le soutien de ces institutions.

Références

- [1] Ahmed S.R., Ramm G. et Faltin G., Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake, SAE Paper 840300, 1984.
- [2] Gilliéron P. et Chometon F., Modeling of stationary three-dimensional separated air flows around an Ahmed reference model, In: 3rd International Workshop on Vortex, ESAIM Proceedings, 1999.
- [3] Lienhart H., Stoots C. et Becker S., Flow and turbulence structures in the wake of a simplified car model (ahmed model), In: DGLR Fach Symposium der AG STAB, Stuttgart, Allemagne, 2000.
- [4] Krajnović S. et Davidson L., Large-eddy simulation of the flow around simplified car model, In: SAE World Congress, Detroit, USA, 2004.
- [5] Gilliéron P. et Kourta A., Aerodynamic drag reduction by vertical splitter plates, Experiments in Fluids 48(1):1-16, 2010.
- [6] Fourrié G., Keirsbulck L., Labraga L. et Gilliéron P., Bluff-body drag reduction using a deflector, Experiments in Fluids 50(2):385-395, 2011.
- [7] Aider J.L., Beaudoin J.F. et Wesfreid J.E., Drag and lift reduction of a 3d bluff-body using active vortex generators, Experiments in Fluids 48(5):771-789, 2, 2010.
- [8] Guilmineau E., Computational study of flow around a simplified car body, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96(6-7):1207-1217, 2008.
- [9] Fares E., Unsteady flow simulation of the ahmed reference body using a lattice Boltzmann approach, Computers and Fluids 35(8-9):940-950, 2005.
- [10] Spohn A. et Gilliéron P., Flow separations generated by a simplified geometry of an automotive vehicle, In: UTAM Symposium on Unsteady Separated Flows, Toulouse, France, 2002.
- [11] Hanratty T.J. et Campbell J.A., Measurement of wall shear stress, In: Fluid Mechanics Measurements, ed. R.J. Goldstein, Hemisphere Publishing Co., 1983.
- [12] Sobolík V., Wein O. et Čermák J., Simultaneous measurement of film thickness and wall shear stress in wavy flow of non-Newtonian liquids, Collection of Czechoslovak Chemistry Communications 52(4):913-928, 1987.
- [13] Mitchell J.E. et Hanratty T.J., A study of turbulence at a wall using an electrochemical wall shear-stress meter, Journal of Fluid Mechanics 26:199-221, 1966.
- [14] Kiya M. et Sasaki K., 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, 1985.
- [15] Thacker A., Contribution expérimentale à l'analyse stationnaire et instationnaire de l'écoulement à l'arrière d'un corps de faible allongement, Thèse de doctorat, Université d'Orléans, France, 2010.
- [16] Sims-Williams D.B., Self-excited aerodynamic unsteadiness associated with passenger cars, Thèse de doctorat, Université de Durham, Royaume-Uni, 2001.
- [17] Khoo B.C., Chew Y.T. et Teo C.J., Near-wall hot-wire measurements: part 2: turbulence time scale, convective velocity and spectra in the viscous sublayer, Experiments in Fluids 31(5):494-505, 2001.
- [18] Luchik T.S. et Tiederman W.G., Timescale and structure of ejections and bursts in turbulent channel flows, Journal of Fluid Mechanics 174:529-552, 1987.
- [19] Krajnović S. et Davidson L., Flow around a simplified car, part 2: understanding the flow, Journal of Fluids Engineering 127(5):919-928, 2005.