



## Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : <http://oatao.univ-toulouse.fr/>  
Eprints ID : 11871

**To cite this version** : Volpe, Raffaele and Ferrand, Valérie and Da Silva, Arthur and Le Moyne, Luis *Etude de l'évolution instationnaire de l'écoulement entourant un véhicule soumis brusquement à un vent latéral*. (2013) In: 15ème Congrès Français de Visualisation et de Traitement d'Images en Mécanique des Fluides, 18 November 2013 - 22 November 2013 (Orleans, France)

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: [staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr](mailto:staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr)

# ETUDE DE L'EVOLUTION INSTATIONNAIRE DE L'ECOULEMENT ENTOURANT UN VEHICULE SOUMIS BRUSQUEMENT A UN VENT LATERAL

Raffaele VOLPE <sup>a</sup>, Valérie FERRAND <sup>b</sup>, Arthur DA SILVA <sup>a</sup>, Luis LE MOYNE <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Laboratoire DRIVE, Institut Supérieur de l'Automobile et des Transports, Université de Bourgogne, 49 rue Mademoiselle Bourgeois, 58000 Nevers

<sup>b</sup> Université de Toulouse, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE), 10 avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse

## Résumé

Les techniques de PIV résolue en temps et de PIV stéréoscopique sont appliquées autour de corps automobiles soumis à un coup de vent latéral. Ainsi, l'évolution instationnaire des efforts aérodynamiques peut être interprétée en lien avec la topologie de l'écoulement. On montre en particulier que la réponse instationnaire du véhicule est dominée par le transitoire de la partie arrière. Le développement de la structure tourbillonnaire d'axe longitudinal apparaissant du côté sous le vent du véhicule soumis à un dérapage apparaît jouer un rôle important dans la réponse instationnaire de efforts aérodynamiques.

**Mots Clés : Aérodynamique instationnaire, rafale, PIV, structures tourbillonnaires**

## 1. Introduction

Il est connu que le vent latéral a un impact sur la stabilité des véhicules. En effet, une rafale soudaine peut générer une variation du moment de lacet qui peut surprendre le conducteur et le mettre en situation de danger, s'il n'est pas capable de corriger sa trajectoire ou si les dispositifs de sécurité contrôlés par l'électronique sont inefficaces. Le risque est encore plus grand pour les véhicules ayant une grande surface exposée au vent, tels que les trains et les camions, puisque le coup de vent peut en provoquer le renversement (Beauvais [1967], Baker [1986]). La correcte reproduction d'une rafale de vent latéral en soufflerie est donc nécessaire pour améliorer la stabilité dynamique des véhicules. En effet, l'utilisation de bancs expérimentaux où une maquette est propulsée à travers un écoulement latéral (Beauvais [1967], Baker et Humphreys [1996], Chadwick [1999]) a permis de mesurer l'évolution instationnaire de la force de dérive et du moment de lacet. Néanmoins, cette méthode n'est pas amplement répandue dans la communauté scientifique, à cause des difficultés de mise en place et de la faible répétabilité des essais, dérivant de l'utilisation de capteurs embarqués. Ce qui est plus commun est d'obtenir les valeurs des efforts latéraux à partir d'essais où la maquette est positionnée à dérapage fixe dans la veine et de reconstruire a posteriori l'évolution du torseur instationnaire à l'aide d'une fonction dite « admittance aérodynamique » (Baker [1991]). Les études reliant l'évolution des efforts à la topologie de l'écoulement sont difficiles à réaliser avec ces approches et sont généralement menées à l'aide des simulations numériques (Tsubokura et al. [2010], Favre et Efraimsson [2011], Krajnovic [2012]). Une approche expérimentale qui permet d'unir les avantages de la maquette stationnaire au réalisme de la maquette mobile consiste à envoyer un courant d'air latéral sur une maquette statique à l'aide d'une véritable soufflerie secondaire (Ryan et Dominy [1998]). L'ISAE de Toulouse a eu l'initiative de créer son propre banc

d'essai pour l'étude des rafales de vent, s'inspirant de ce principe. L'objectif de cette étude est de mesurer, à l'aide de techniques PIV, l'évolution instationnaire de l'écoulement entourant une voiture soumise à un coup de vent latéral et de la relier au torseur instationnaire des efforts. Des résultats CFD, réalisée par les mêmes auteurs, sont aussi présentés. Deux géométries de corps d'automobile simplifié, le corps de Windsor (Howell [1993]), ont été étudiées. Les deux maquettes sont différentes par la présence ou pas d'une lunette arrière inclinée de 25°, qui engendre une hausse de la traînée du véhicule, comme l'ont montré Ahmed et al. [1983].

## 2. Moyens employés

Le banc d'essais utilisé se base sur l'approche d'une maquette statique soumise à un vent latéral mobile. Plus précisément, il s'inspire de celui réalisé par Ryan et Dominy [1998], où une double soufflerie est employée, Fig. 1. En particulier, la soufflerie principale est de type veine ouverte (section  $L_y^{princ} = 0.45$  m,  $L_z^{princ} = 0.21$  m, longueur  $L_x^{princ} = 1.5$  m) et dont la paroi latérale est connectée à la soufflerie secondaire (section de sortie  $L_x^{sec} = 0.9$  m,  $L_z^{sec} = 0.15$  m). Les deux souffleries communiquent entre elles grâce à un système de volets dont l'ouverture/fermeture est commandée par un système de pilotage centralisé. La simulation d'une rafale de vent déferlant dans la veine principale est alors obtenue en ouvrant un à un les volets de la soufflerie secondaire, en séquence. Une description plus détaillée du banc est reportée dans Volpe et al. [2013].

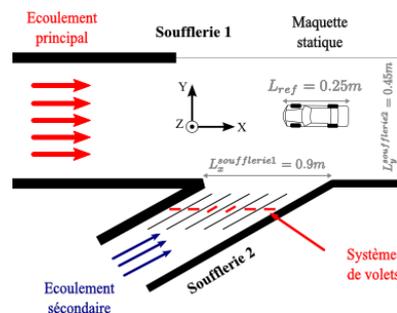


Fig. 1. Schéma du banc d'essais « Rafale latérale »

L'instrument utilisé pour mesurer les efforts aérodynamiques est une balance dard à 5 composantes, sa pleine échelle étant 10 N pour les forces et 0.5 Nm pour les moments. Dans ce document, seulement les efforts de force de dérive et moment de lacet seront discutés. Le signal a été filtré à 35 Hz et corrigé à l'aide de la fonction de réponse en fréquence de la balance, mesurée à l'aide d'un pot vibrant inductif.

Deux instrumentations PIV ont été utilisées pour la mesure des champs de vitesse. La première consiste en un système TR-PIV, composé d'un laser Nd-YLF (longueur d'onde 532 nm, énergie 20 mJ par pulsation et fréquence maximale 10 kHz), et d'une caméra Phantom v12 (capteur CMOS « double frame », fréquence d'échantillonnage maximale 1 kHz, résolution 1200 × 800 pixels, objectif 35 mm). Une instrumentation de PIV stéréoscopique a été aussi employée, cette dernière présentant un laser Nd-YAG de longueur d'onde 532nm, d'énergie 30 mJ par pulsation et de fréquence maximale 8 Hz et deux caméras HiSense Type 11 avec capteur CCD possédant fréquence maximale de 4Hz et une résolution de 1280 × 1024 pixels. Cette dernière instrumentation a été synchronisée avec le système de pilotage du banc « rafale latérale » afin que la mesure PIV soit déclenchée avec un délai prédéfini par l'utilisateur, permettant la reconstruction du champ de vitesse instationnaire.

Concernant la méthode de traitement des images, des fenêtres d'interrogation de taille 32 pixels de côté ont été utilisées, avec un recouvrement à 50 %. Les champs vectoriels provenant des essais de PIV stéréoscopique ont été traités par inter-corrélation d'images ; par contre, le traitement par inter-corrélation adaptative en deux passages [87] s'est avéré plus efficace pour les champs issus des essais de TR-PIV.

Les champs vectoriels obtenus sont ensuite validés suivant deux critères : un premier lié à la qualité du signal (le rapport entre les deux principaux pics d'inter-corrélation doit être supérieur à 1.2), et un deuxième, associé à la physique de l'écoulement (en un point donné, seulement les vecteurs contenus dans la plage  $\|\vec{V}\| \in [-5V^{princ}; 5V^{princ}]$  sont acceptés). Les vecteurs ne satisfaisant pas un des deux critères ont été rejetés.

Quant à l'étude numérique, une reproduction 3D de l'entier banc d'essais a été réalisée sous Fluent, Fig.2. L'ouverture/fermeture des volets est simulée avec l'imposition d'une perte de charge. L'approche LES, avec modèle de sous-grille de Smagorinsky - Lilly, a été utilisé pour la modélisation de la turbulence.

### 3. Résultats

Dans notre étude, le temps a été adimensionné comme suit :

$$t^+ = t \frac{V^{princ}}{L_{ref}} \quad (1)$$

où  $L_{ref}$  et  $V^{princ}$  sont respectivement la longueur du véhicule et sa vitesse d'avancement. Une unité de temps adimensionné correspond donc au temps nécessaire à la maquette pour parcourir sa longueur. Au niveau du banc d'essais, la longueur de référence est celle de la maquette ( $L_{ref} = 0.25$  m) et la vitesse d'avancement est celle de l'écoulement principal ( $V_{ref} = 9$  m/s). Toutes les autres grandeurs ont été adimensionnées avec la vitesse de l'écoulement secondaire ( $V_{aux} = 10.39$  m/s). Le nombre de Reynolds obtenu est  $1.73 \cdot 10^5$ .

#### 3.1. Caractérisation de la veine hors maquette : résultats principaux

Des champs instantanés provenant des mesures TR-PIV de caractérisation de la veine nue sont présentés en Fig. 2a, pour une rafale de durée  $t_{raf}^+ = 10$ . La grandeur en couleur est l'angle de dérapage  $\beta$ , défini comme l'angle entre les composantes de vitesse longitudinale  $u^+$  et transversale  $v^+$ . Lorsque le flux est établi, l'angle de dérapage atteint  $21^\circ$ . Sur la Fig. 2b est affichée l'évolution des composantes adimensionnelles  $u^+$  et  $v^+$ , pour les points A, B, C de Fig. 2a, qui représentent respectivement les positions du flanc au vent, du centre de gravité et du flanc sous le vent de la maquette. Les sursauts de  $u^+$  se présentant à l'arrivée ( $t^+ = 0$ ) et à la sortie de la rafale ( $t^+ = 10$ ) dérivent de la naturelle interpénétration entre les deux écoulements mis en jeu (Volpe et al. [2013]). La Fig. 2 montre aussi l'absence de gradient spatial dans la région de mesure du banc d'essais.

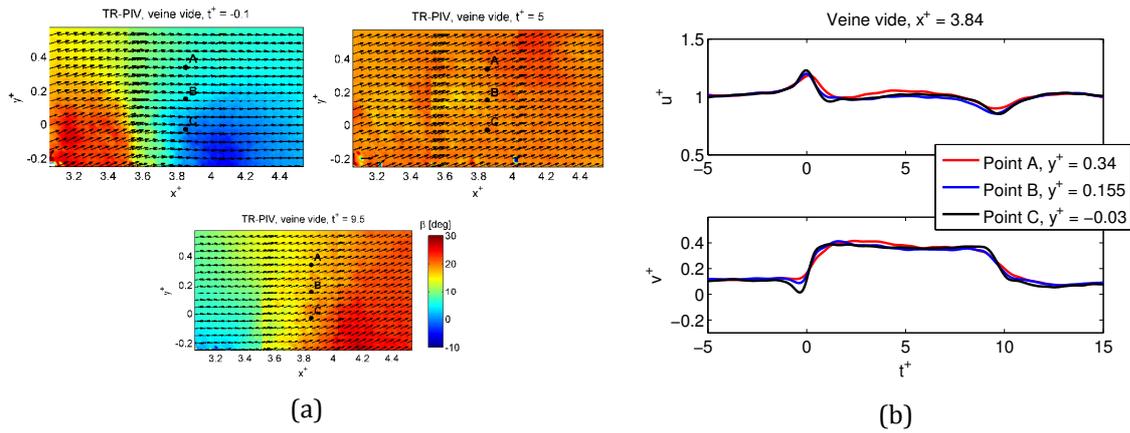


Fig. 2. Caractérisation de la région de mesure du banc d'essais, champs instantanés de l'angle de dérapage, (a), gradient des composantes de vitesse dans la région où la maquette a été placée, (b)

### 3.2. Evolution instationnaire des efforts latéraux lors d'une rafale de vent

La Figure 4 fournit l'évolution des efforts de force de dérive et de moment de lacet, obtenus expérimentalement pour une durée de rafale de  $t_{raf}^+ = 20$ . Des sursauts sont visibles après l'arrivée de la rafale. En particulier le maximum du coefficient de force de dérive  $C_{Fy}$  est atteint à  $t^+ = 1.7$ , pour les deux géométries. L'effort se maintient jusqu'à  $t^+ = 3.4$ , puis s'établit. La valeur maximale dépasse de 7% celle établie. Notons que l'effort maximum est atteint après que l'immersion totale de la maquette dans l'écoulement. Cela est cohérent avec le retard de phase observé dans les bancs à maquette tournante de Cairns [1994] et Chometon et al. [2005]. L'évolution temporelle de la force de dérive ne semble pas être affectée par la géométrie de la lunette arrière. L'évolution du coefficient de moment de lacet  $C_{Mz}$  a deux sursauts, à  $t^+ = 1$  and  $t^+ = 3$ , avant de s'établir. En particulier, le pic d'effort est atteint au premier pic pour la maquette à culot droit (sursaut de 16%), tandis que le maximum de moment de lacet se manifeste après pour la maquette à culot incliné, avec un sursaut plus petit, de 10%. Cela indique que la géométrie de la lunette arrière n'influence le comportement instationnaire que dans les premiers instants de la rafale, ensuite elle agit que sur la valeur établie.

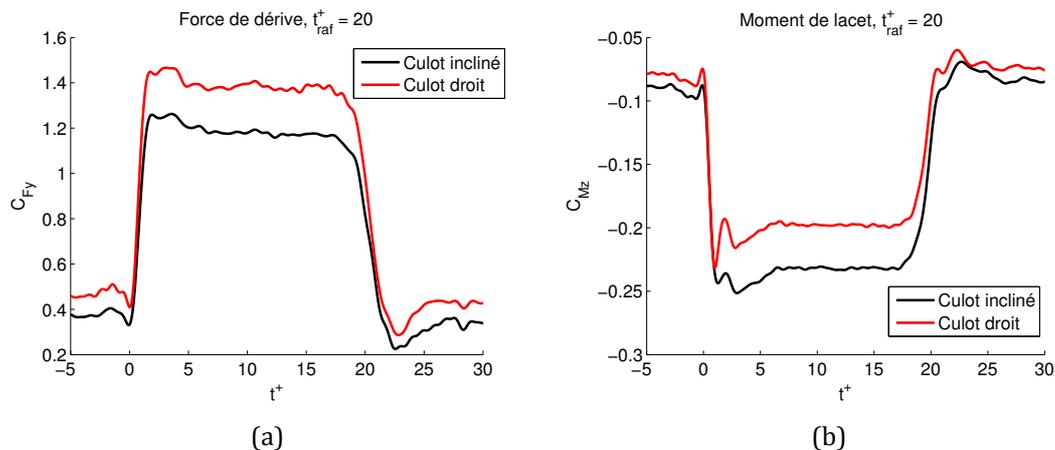


Fig. 3. Evolution instationnaire des efforts latéraux sur un corps de Windsor lors d'une rafale de vent, pour deux inclinaisons de la lunette arrière : coefficient de force de dérive  $C_{Fy}$  (a), coefficient de moment de lacet  $C_{Mz}$  (b)

### 3.3. Evolution instationnaire de l'écoulement entourant la maquette

En Fig. 4a-b, le champ de vitesse adimensionnelle,  $V_{xy}^+$  ( $x^+, y^+, z^+ = 0.16, t^+$ ), entourant les deux maquettes, est présenté. Etant l'établissement des efforts à  $t^+ = 7$ , des rafales de durée  $t_{raf}^+ = 10$  ont été étudiées. Deux instants ont été choisis : juste après l'arrivée de la rafale ( $t^+ = 1$ ) et lors de l'établissement des efforts ( $t^+ = 7$ ). Pendant ces instants, la maquette est complètement immergée dans l'écoulement secondaire : toute différence entre ces extraits peut être interprétée comme une manifestation de l'évolution instationnaire de l'écoulement. Dans le plan présenté, les variations les plus évidentes sont situées près du flanc sous le vent de la maquette. En effet, si l'on trace l'évolution de la vitesse pour des points à proximité des parois de la maquette (12.5 mm, Fig. 4c-f), il est visible que la région à plus haute vitesse, située à l'avant du flanc sous le vent, est assez stable pendant la période de variation des efforts ( $1 < t^+ < 5$ ). A l'inverse, aucun établissement n'est visible à l'arrière du même flanc, ce qui confirme les résultats de Ferrand et Grochal [2012], qui ont vu un temps d'établissement plus long à l'arrière du véhicule. Les seules instationnarités visibles au flanc au vent sont les mêmes sursauts visibles en veine nue lors du passage des fronts d'entrée et de sortie de la rafale. La géométrie de la maquette a peu d'influence sur le comportement instationnaire de l'écoulement, sauf pour  $1 < t^+ < 2$ , où on peut observer une différence au centre de la maquette. Cette différence est compatible avec le différent comportement du moment de lacet, Fig. 3b. Après  $t^+ = 3$ , la géométrie de la lunette arrière influe davantage sur la valeur moyenne du champ. Aussi ce résultat est cohérent avec les évolutions des efforts latéraux, Fig. 3.

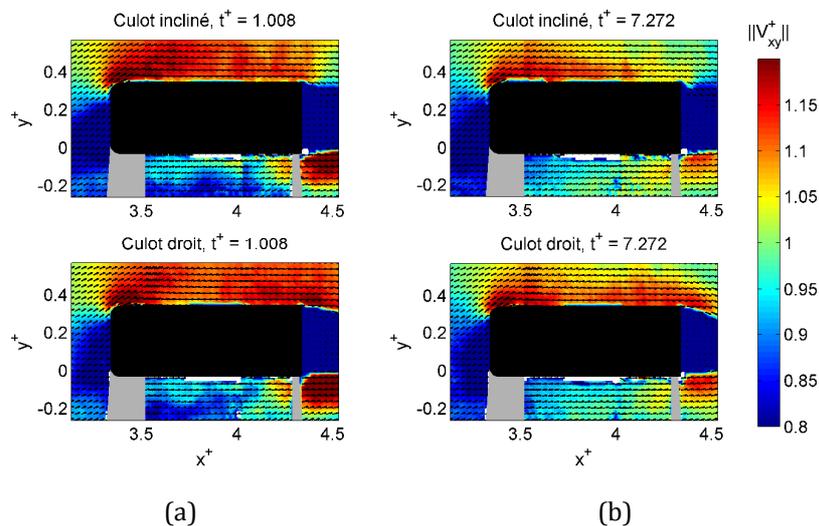


Fig. 4. Evolution instationnaire du champ de vitesse sur un corps de Windsor lors d'une rafale de vent, pour deux inclinaisons de la lunette arrière : norme de la vitesse adimensionnée  $V_{xy}^+$  au pic du moment de lacet (a) et lors de l'établissement de l'écoulement (b)

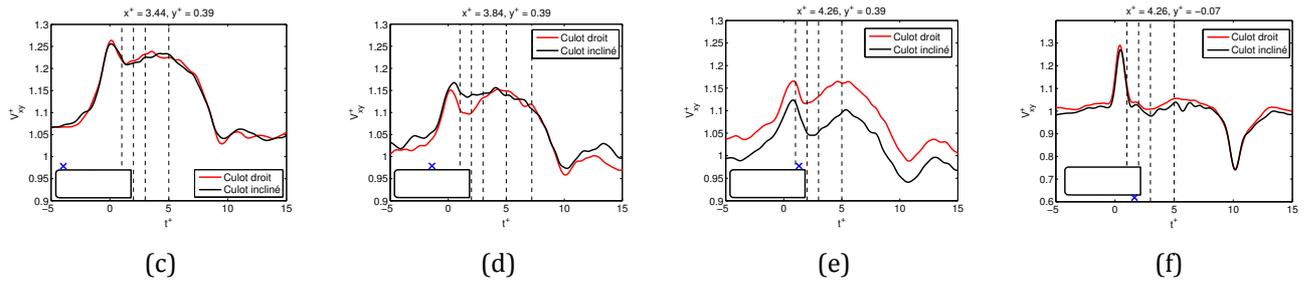


Fig. 4. (continue) Evolution de la vitesse à proximité des maquettes (c-f)

La partie arrière du véhicule étant la plus sensible au déferlement de la rafale, nous avons fait des mesures de PIV stéréoscopique, sur un plan vertical positionné 5 mm en aval du culot de la maquette, pour  $t^+ = 1.8$  et  $t^+ = 6.192$ . Il apparaît que le principal tourbillon,  $\Gamma_A$ , se développant à proximité du flanc sous le vent, s'écarte de ce dernier au fil du temps ( $\delta y^+ > 0$ ), dans le cas de la maquette à culot incliné, comme mieux montré en Fig. 6a. Ici est reportée l'évolution de la position du centre du tourbillon  $\Gamma_A$ , calculé avec la formulation du critère Q. Les barres d'erreur représentent l'écart type des positions du centre de  $\Gamma_A$  de l'ensemble des 20 répétitions utilisées pour calculer le champ moyen. La position moyenne du vortex a une période de transition avant de converger vers sa position établie. Il semble que la différence de géométrie à l'arrière a peu d'influence sur  $\Gamma_A$  avant  $t^+ < 3$ , quand les variations des efforts latéraux sont bien évidentes. Après cet instant, la distance entre le centre de  $\Gamma_A$  et la paroi sous le vent est statistiquement plus élevée dans le cas de la maquette avec lunette arrière inclinée. Cela signifie que la forme de la lunette arrière n'influence pas le transitoire des efforts, mais plutôt leur valeur établie. Ce comportement est confirmé par des calculs numériques LES (Volpe [2013]), Figure 7b, où l'évolution des principales structures tourbillonnaires a été tracée au moyen d'un ensemencement de particules sans masse. Il en ressort que le détournement de la structure  $\Gamma_A$  est engendré par la formation d'une structure très énergétique provenant du couplage du tourbillon du toit,  $\Gamma_C$ , et du tourbillon longitudinal se situant au côté au vent,  $\Gamma_{L,AV}$ . Cette dernière structure n'existant pas dans le cas de la maquette à culot droit, l'étendue de  $\Gamma_C$  n'est pas suffisamment élevée pour avoir influence sur  $\Gamma_A$ .

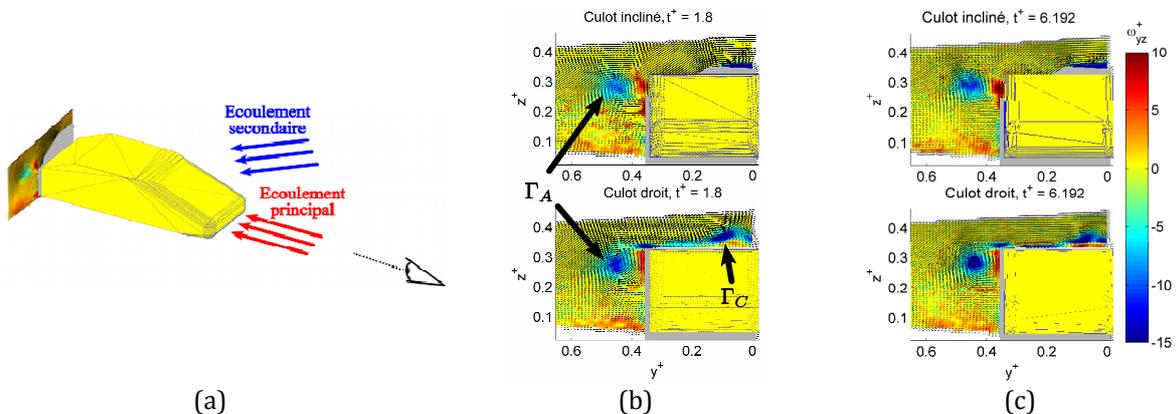


Fig. 5. Evolution instationnaire de l'écoulement autour d'un corps de Windsor lors d'une rafale de vent : mesures de PIV stéréoscopique du champ de vorticité adimensionnée  $\omega_{yz}^+$ . Positionnement du plan de mesure, (a), résultats lors du pic de moment de lacet (b) et de l'établissement de l'écoulement (c)

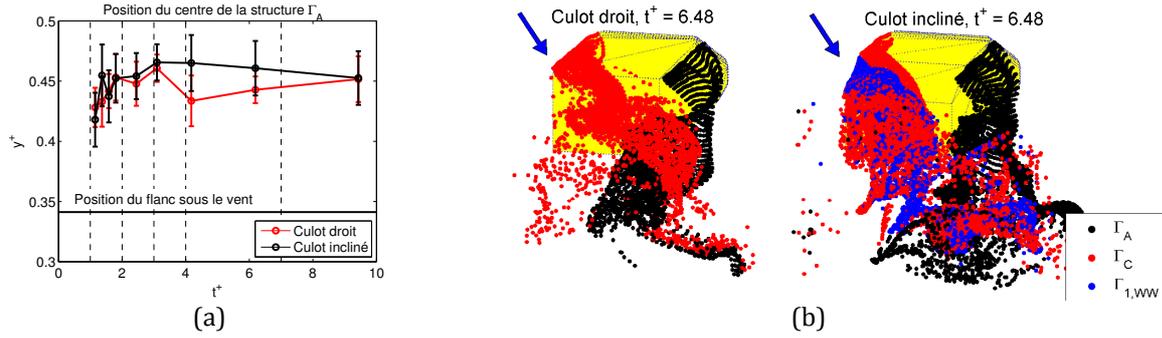


Fig. 6. Position du tourbillon  $\Gamma_A$  pendant la rafale, localisation du centre de la structure, (a), calculs CFD (b)

D'un point de vue quantitatif, il est opportun d'introduire la circulation  $\gamma^+$  du vecteur  $\vec{V}^+$  sur le contour fermé d'un cercle  $C$  appartenant au plan  $(y, z)$  et dont le centre correspond au point de plus grande intensité du vecteur tourbillon  $\vec{\omega}^+$  :

$$\gamma^+ = \oint_{\partial C} \vec{V}^+ \cdot d\vec{l} = 2 \iint_C \vec{\omega}^+ \cdot \vec{x} dS \quad (2)$$

Etant la structure  $\Gamma_A$  la plus importante sur un plan à  $x^+$  constant, sa circulation peut être corrélée aux efforts latéraux locaux (théorème de Kutta-Joukowski). En Fig. 7, l'évolution de la circulation de  $\Gamma_A$  est comparée à celle des efforts latéraux. Le calcul du coefficient de corrélation indique entre circulation et efforts indique que la corrélation est forte avec la force de dérive (80%) et bonne avec le moment de lacet (55%), indiquant la forte contribution de  $\Gamma_A$  aux efforts latéraux.

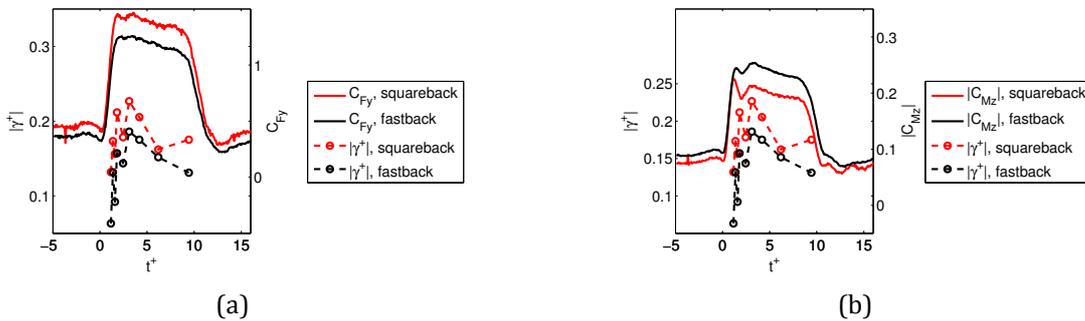


Fig. 7. Comparaison de l'évolution de la circulation de la structure  $\Gamma_A$  avec celle de la force de dérive (a) et celle du moment de lacet (b)

#### 4. Conclusions

Le passage de deux véhicules, différant par la géométrie de la lunette arrière, dans une rafale de vent a été simulé, à l'aide d'un banc d'essais composé d'une double soufflerie. L'évolution de l'écoulement entourant la maquette a été relevé avec des techniques de PIV résolue en temps ou stéréoscopique. La topologie de l'écoulement a ensuite été reliée avec l'évolution des principaux efforts latéraux. Il en est ressorti que la différente géométrie arrière n'influence que l'établissement de ces efforts : en effet, c'est la partie arrière à être plus sensible aux instationnarités engendrées par le coup de vent. En particulier, si la lunette arrière induit des tourbillons longitudinaux, ces derniers peuvent influencer la position de la principale structure se formant au flanc sous le vent,  $\Gamma_A$ , qui influence la valeur établie de l'effort. Le calcul de la circulation de cette structure

a aussi démontré que les efforts latéraux sont influencés par l'évolution de  $\Gamma_A$ , étant donc ce dernier le meilleur témoin des phénomènes instationnaires mis en jeu.

## Références

- Ahmed, S., Ramm, R., Falin, G., [1984] *Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake*, SAE Paper n° 840300.
- Baker, C. J., [1986] *A Simplified Analysis of Various Types of Wind Induced Road Vehicle Accidents*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 22, p. 69-85.
- Baker, C. J., [1991] *Ground vehicles in high cross winds part II: Unsteady aerodynamic forces*, Journal of Fluids and Structures, Vol. 5, p. 91 – 111.
- Baker, C. J., Humphreys, N. D., [1996] *Assessment of the adequacy of various wind tunnel techniques to obtain aerodynamic data for ground vehicles in cross winds*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 60, p. 49 – 68.
- Beauvais, F. [1967] *Transient nature of wind gust effects on an automobile*, SAE Paper n° 670608.
- Chadwick, A., [1999] *Crosswind aerodynamics of sports utility vehicles*, PhD Thesis, Cranfield University, UK.
- Favre, T., Efraimsson, G., [2011] *An Assessment of Detached-Eddy Simulations of Unsteady Crosswind Aerodynamics of Road Vehicles*, Flow, Turbulence and Combustion, Vol. 87, p. 133-163.
- Ferrand, V., Grochal, B., [2012] *Forces and Flow Structures on a Simplified Car Model Exposed to a Transient Crosswind*, Proceedings of the ASME 2012 Fluids Engineering Summer Meeting, Puerto Rico, 8 – 12 juillet
- Howell, J., [1993] *Shape features which influence crosswind sensitivity*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, IMechE 1993-9, Vehicle Ride and Handling, 1993, p. 43-52.
- Krajnovic, S., Ringqvist, P., Nakade, K., Basara, B., [2012] *Large eddy simulation of the flow around a simplified train moving through a crosswind flow*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 110, p. 86 – 99.
- Ryan, A., Dominy, R., [1998] *The Aerodynamic Forces Induced on a Passenger Vehicle in Response to a Transient Cross-Wind Gust At a Relative Incidence of 30°*, SAE Paper n° 980392.
- Tsubokura, M., Nakashima, T., Kitayama, M., Ikawa, Y., Doh, D. H., Kobayashi, T., [2010] *Large eddy simulation on the unsteady aerodynamic response of a road vehicle in transient crosswinds*, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 31, p. 1075 – 1086.
- Volpe, R. [2013] *Analyse expérimentale et numérique du comportement instationnaire de véhicules terrestres en présence d'un vent latéral instationnaire*, thèse de doctorat, Université de Bourgogne.
- Volpe, R., Da Silva, A., Ferrand Valérie, Le Moyne, L., [2013] *Experimental and numerical validation of a wind gust facility*, Journal of Fluids Engineering, Vol. 135, p. 011106-1 – 9.