



## 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: 5267

**To cite this document:** Volpe, Raffaele and Ferrand, Valérie and Da Silva, Arthur *Validation d'un banc d'essais reproduisant les rafales de vent sur véhicule terrestre. Caractérisation de l'écoulement par TR-PIV.* (2011) In: 14ème Congrès Français de Visualisation et de Traitement d'Images en Mécanique des Fluides (FLUVISU), 21–25 Nov 2011, Lille, France.

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

---

# VALIDATION D'UN BANC D'ESSAIS REPRODUISANT LES RAFALES DE VENT SUR VEHICULE TERRESTRE. CARACTERISATION DE L'ÉCOULEMENT PAR TR-PIV

Raffaele VOLPE <sup>a,\*</sup>, Valérie FERRAND <sup>b</sup>, Arthur DA SILVA <sup>a</sup>

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

<sup>b</sup> Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, 10 avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse

\* raffaele.volpe@u-bourgogne.fr

---

## Résumé

Les phénomènes aérodynamiques instationnaires apparaissant autour des véhicules terrestres lors de rafales latérales, demeurent encore mal connus de par les difficultés, tant expérimentales que numériques, à reproduire fidèlement ces situations en laboratoire. L'ISAE a développé un banc d'essai, inspiré des travaux de Ryan et Dominy (Ryan et Dominy [2000]), dans lequel le déferlement de la rafale sur la maquette automobile est reproduit par un jet latéral mobile longitudinalement. L'écoulement généré par ce dispositif est validé par PIV résolue en temps dans ce présent document. L'angle de dérapage obtenu lors d'une simulation de rafale présente une évolution temporelle proche du créneau, avec un plateau compris voisin de 25°.

**Mots Clés : Aérodynamique automobile, vent traversier, aérodynamique instationnaire, TR-PIV**

---

## 1. Introduction

Lors de son déplacement sur route, l'écoulement auquel est soumis un véhicule automobile évolue continuellement en direction et intensité. Certains événements, tels que le dépassement, le croisement, la sortie de tunnel ou la traversée d'une zone ventée, associés à des brusques apparitions d'écoulement transverse à la direction d'avancement, peuvent entraîner des variations violentes des efforts aérodynamiques perçus par le véhicule (Beauvais [1967]). Une meilleure compréhension des mécanismes physiques responsables de l'instationnarité du torseur aérodynamique en réponse à des vents latéraux fluctuants apparaît essentielle pour améliorer la stabilité dynamique des véhicules et ainsi le confort et la sécurité du conducteur, voir Macklin et al [1996], Barnard [1996]. Cependant, la reproduction et la mesure de ces phénomènes transitoires en soufflerie restent complexes (Passmore et al [2001], Baker et Humphreys [1996]) et n'ont pas encore permis d'interpréter l'instationnarité des efforts aérodynamiques en lien avec la topologie de l'écoulement. Les simulations numériques LES (Large Eddy Simulation) et DES (Detached Eddy Simulation) apparues récemment sur cette thématique semblent fournir des prédictions prometteuses sur les effets transitoires pour des nombres de Reynolds modérés (Favre et Efraimson [2011], Krajnovic [2008], Guilmineau et Chometon [2009]). L'objectif de l'étude est de développer un moyen expérimental capable de reproduire les effets instationnaires du passage d'un véhicule dans une rafale de vent latéral. Par la suite, les structures instationnaires se développant autour du corps seront mesurées par PIV résolue en temps et reliées aux efforts transitoires. Les nombres de Reynolds caractéristiques du montage seront compatibles avec les simulations numériques des grandes échelles afin de permettre leur confrontation aux résultats expérimentaux. L'article présent rassemble les résultats de la première phase de l'étude visant à concevoir et qualifier le dispositif proprement dit.

---

---

---

## 2. Techniques de simulation des coups de vent latéraux en soufflerie et positionnement de l'étude

Les premiers bancs expérimentaux conçus pour reproduire le passage d'un véhicule dans une zone de vent latéral instationnaire consistent à propulser une maquette perpendiculairement à la section d'essais d'une soufflerie (Beauvais [1967], Baker et Humphreys [1996], Cairns [1994], Chadwick [1999]). Une autre approche, étendant les mesures classiques de dérapage statique au cas dynamique, vise à faire osciller la maquette autour de l'axe vertical dans un écoulement amont stationnaire (Garry et Cooper [1998], Cairns [1994], Mansor et Passmore [2007], Chometon et al. [2005]). Pour ces deux approches, les effets transitoires sont difficilement accessibles en raison d'une forte sensibilité des mesures aux vibrations parasites des systèmes de mise en mouvement de la maquette. Une alternative consiste à exploiter des essais statiques obtenus pour une maquette fixe en dérapage en reconstruisant à posteriori l'évolution du torseur aérodynamique instationnaire pour un profil et une densité de puissance spectrale de vent donnés, à l'aide d'une fonction dite « admittance aérodynamique » (Cooper [1984], Baker [1991], Sterling et al [2009]). Bien qu'il s'agisse d'une technique documentée et validée, elle ne permet pas d'accéder à l'instationnarité du torseur aérodynamique provenant de l'entrée progressive du corps automobile dans le courant d'air latéral.

La solution retenue dans la présente étude s'inspire du montage introduit par Dominy [1991]. Une maquette fixe est placée dans un écoulement longitudinal stationnaire et un jet d'air latéral mobile simule la rafale de vent transverse. La caractérisation du dispositif et son application sur des corps simples automobiles ont fait l'objet de mesures de pression instationnaires (Dominy et Ryan [1999]; Ryan [2000]; Ryan et Dominy [2000]). Des difficultés sont apparues pour obtenir une bonne réponse fréquentielle de ces capteurs et d'autre part, ces mesures ponctuelles n'ont pas permis une visualisation des structures instationnaires présentes dans l'écoulement et pilotant les efforts instationnaires. Nous nous proposons ici d'aller plus loin dans la qualification et l'application de ce moyen d'essais, grâce à l'analyse des champs de vitesse instantanés obtenus par PIV résolue en temps.

Le banc « rafale latérale » et les outils utilisés pour sa validation sont présentés. Par la suite, les résultats obtenus, en termes d'angle de dérapage, sont exposés à la fois en configuration de vent latéral stationnaire et en configuration « coup de vent ».

## 3. Le banc d'essais « rafale latérale » de l'ISAE

### 3.1 Principe de fonctionnement et géométrie

Le présent travail de qualification du banc d'essais fait suite aux études préliminaires associées à la conception du banc d'essais « rafale latérale » de l'ISAE (Joseph [2008], Masseboeuf [2009]).

Le dispositif expérimental est constitué une soufflerie principale veine ouverte (référencée dans la suite « soufflerie 1 », section  $L_{\text{soufflerie1}} = 450 \times h_{\text{soufflerie1}} = 210$  mm, longueur  $l_{\text{soufflerie1}} = 1000$  mm) et dont la paroi latérale est connectée à une soufflerie secondaire (« soufflerie 2 », section de sortie  $L_{\text{soufflerie2}} = 900$  mm  $\times$   $h_{\text{soufflerie2}} = 150$  mm). L'angle entre les deux souffleries est  $\beta_{\text{soufflerie2}} = 30^\circ$  (Figures 1 et 2). La pénétration de l'écoulement transverse dans la veine principale est pilotée par un système de 20 volets disposés à l'extrémité de la soufflerie secondaire. L'ouverture et la fermeture de ces volets sont commandées individuellement par électroaimants. Afin de maintenir une vitesse de sortie constante dans chacun des 20 canaux formant la paroi latérale indépendamment du nombre de volets ouverts, un débit de fuite est créé en doublant chacun de ces volets en partie inférieure de la soufflerie

---

secondaire. Ainsi si un volet est fermé en partie supérieure (vers la veine principale), son homologue en partie basse est ouvert et laisse échapper un débit équivalent.

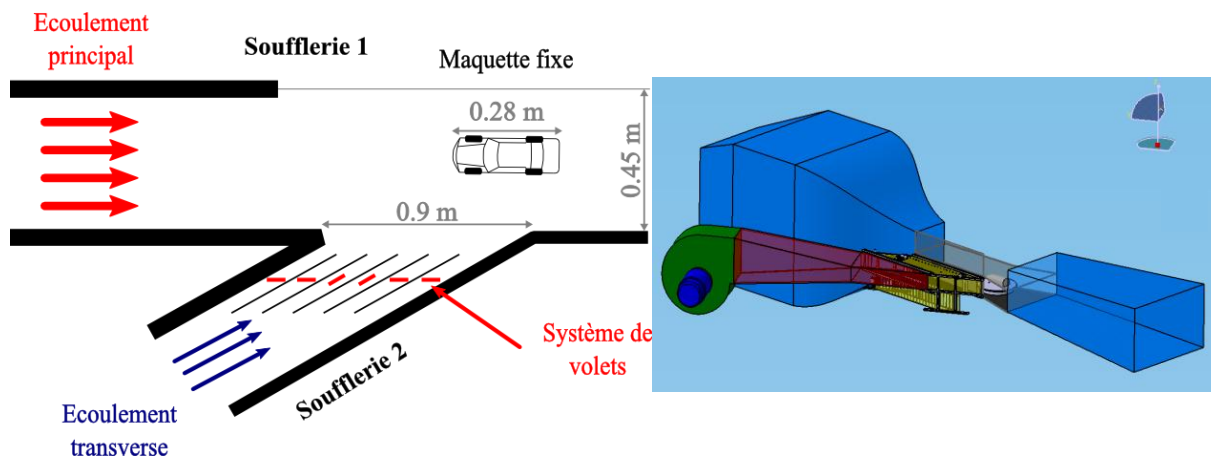


Figure 1: Schéma du banc d'essai

Figure 2: Dessin CAO du banc d'essai

La vitesse de la soufflerie principale est fixée à  $V_{\text{soufflerie1}} = 9 \text{ m/s}$  correspondant à un nombre de Reynolds  $1,8 \cdot 10^5$  basé sur une longueur de maquette de 28 cm. La composante longitudinale de la vitesse débitante  $V_{\text{soufflerie2}}$  de la soufflerie secondaire est imposée égale à  $V_{\text{soufflerie1}}$ , donnant donc une vitesse de 10.39 m/s (Figure 3a). Pour reproduire une situation de « coup de vent » latéral le plus réaliste possible, la vitesse longitudinale  $U$  dans la veine d'essais résultante du mélange entre les deux jets, doit rester aussi insensible que possible à la présence du courant d'air latéral alors que la composante transversale  $V$  présente une évolution temporelle en créneau lors du passage de la rafale (Figure 3b).

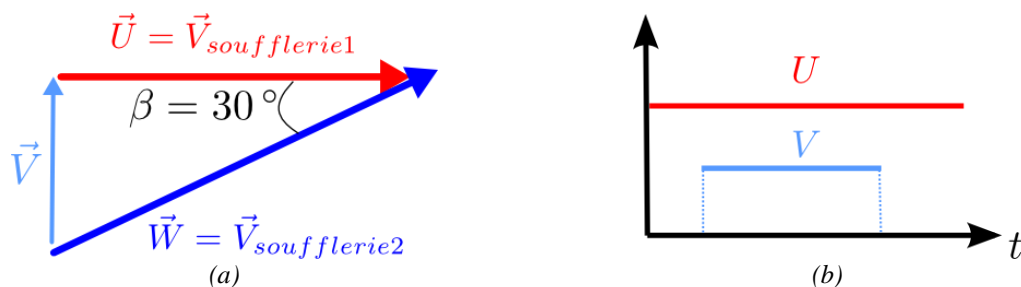


Figure 3: Vitesse théorique relevée en un point de la veine d'essais lors du passage d'une rafale (a) : triangle des vitesses, (b) : évolution des composantes  $U$  et  $V$  dans le temps

La simulation d'une rafale de vent déferlant dans la veine principale est obtenue en ouvrant séquentiellement les volets de la soufflerie secondaire. La vitesse d'ouverture de chaque volet et l'enchaînement des ouvertures doivent permettre un avancement du « front » de la rafale égal à  $V_{\text{soufflerie1}}$ . Cette contrainte forte a été surmontée par l'utilisation d'électroaimants suralimentés commandés par Labview. La durée de la rafale est liée au temps d'ouverture des portes. Les essais présentés correspondent à un temps de rafale de 311 ms soit 10 longueurs de maquettes. Dans ces conditions, les 20 volets sont ouverts simultanément durant 211 ms. La fin de la rafale est associée à la fermeture séquentielle des volets supérieurs.

Les conditions de vent transverse stationnaire sont reproduites maintenant ouverts tous les volets supérieurs.

### 3.2 Instrumentation mise en place pour la qualification du banc d'essais

Le réglage des vitesses  $V_{\text{soufflerie1}}$  et  $V_{\text{soufflerie2}}$  est effectué en utilisant deux tubes de Pitot : le premier est placé juste en amont de la section d'essai, l'autre est positionné avant le système de portes, en face du dixième canal. Ces vitesses sont relevées de manière synchronisée aux champs PIV.

Le champ de vitesse résultant du mélange des deux écoulements issus des souffleries principale et secondaire est qualifié par PIV résolue en temps. Le laser utilisé est un Nd-YLF de longueur d'onde  $\lambda = 532 \text{ nm}$  et d'énergie 20 mJ par pulse et de fréquence  $f_{\text{laser}} = 10 \text{ kHz}$ . La caméra iNanoSense MkIII intensifiée possède une résolution de  $1280 \times 1024$  pixels et fréquence d'échantillonnage maximale de 1 kHz. Les essais statiques ont été effectués à une fréquence d'acquisition de 4 Hz et les essais instationnaires à une fréquence de 500 Hz.

Le champ d'intérêt de la qualification est représenté en Figure 4. Il s'agit d'un plan horizontal situé à mi-hauteur de la veine de la soufflerie 1, ce qui correspond à  $3/4$  de la hauteur de la maquette dans son futur positionnement. Au cours des essais statiques cette région a été décomposée en 4 fenêtres de visualisation de taille  $218 \times 207 \text{ mm}$ , et en 9 fenêtres de taille  $134 \times 105 \text{ mm}$  pour les essais instationnaires. Le repère utilisé par la suite est présenté sur la Figure 4a. Toutes les longueurs sont normalisées par la longueur de maquette de référence  $L_{\text{réf}} = 0.28 \text{ m}$ .

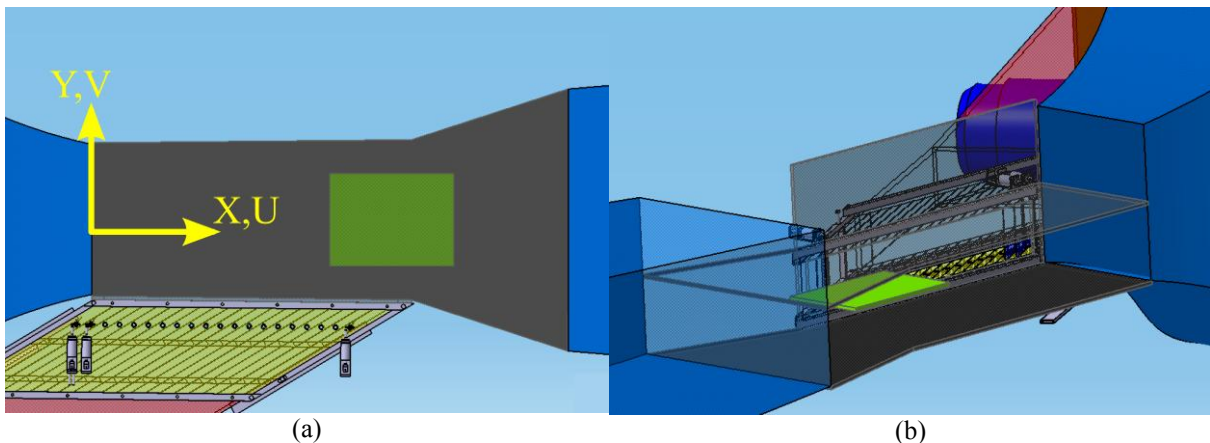


Figure 4: Positionnement du plan étudié (a) : vue de dessus, (b) : vue de côté

Pour ce qui concerne les mesures stationnaires, les résultats présentés sont des moyennes statistiques sur 100 champs instantanés, pour les simulations des rafales le système PIV a été synchronisé avec la commande d'ouverture du premier volet, ce qui permet de présenter des moyennes de phase sur 15 essais.

Les calculs d'intercorrélation sont effectués à l'aide du logiciel « Flowmanager » de Dantec ; Des intercorrélations adaptatives avec une taille finale de maille d'analyse de 64 pixels et un recouvrement de 50% ont fourni une résolution spatiale de 3.5 mm.

Les vecteurs sont validés suivant deux critères : un premier lié à la qualité du signal (le rapport entre les deux principaux pics d'intercorrélation est exigé supérieur à 1.1) et un deuxième associé à la physique de l'écoulement (en un point donné, seulement les vecteurs contenus dans une plage de vitesses imposée sont acceptés). Les vecteurs ne satisfaisant pas les deux critères sont rejetés.

---

## 4. Caractérisation du banc d'essai

### 4.1 Vent transverse stationnaire

Avant d'évaluer les prestations dynamiques du banc, on a étudié les conditions de vent latéral stationnaire à utiliser comme référence pour la suite ; en Figure 5 est représenté le champ d'angle de dérapage en cette configuration, l'image présente une zone masquée par manque d'ensemencement dans cette région pendant les essais.

On définit l'angle de dérapage  $\beta$  comme :

$$\beta(t) = \arctg\left(\frac{V(t)}{U(t)}\right) \quad (1)$$

où U et V sont respectivement les composantes de vitesse en direction X et Y, selon le repère présenté sur la Figure 3a.

On remarque que le dérapage dans la région d'essai n'est pas constant : l'angle de dérapage décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne des portes de la soufflerie 2 (partie basse de la Figure 5). Cet effet vient de la présence de l'écoulement de la soufflerie 1 qui redresse le vent en sortie de la soufflerie 2. Dans la partie centrale du champ, dans laquelle sera positionnée la maquette, l'angle de dérapage reste voisin de 25°. Ces valeurs sont assez communément retrouvées dans la réalité et correspondent par exemple aux dérapages typiques pour un train grande vitesse (Baker [2010]).

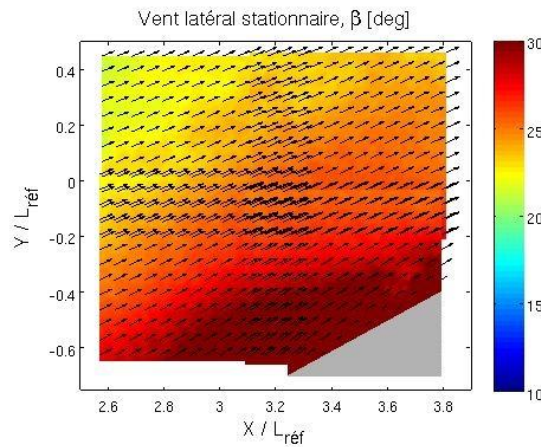


Figure 5: Mesures PIV d'angle de dérapage en présence d'un vent transverse

### 4.2 Reproduction d'une rafale de vent

La rafale de vent de référence pour la validation du banc d'essai comporte les caractéristiques suivantes : durée de rafale 311 ms correspondant à 10 longueurs maquettes pour une vitesse de déferlement longitudinal de 9 m/s.

Des extraits de la séquence temporelle d'images PIV (fréquence d'acquisition de 500 Hz) sont présentés sur la Figure 6. La grandeur colorée met en évidence l'évolution de l'angle de dérapage à l'arrivée du front de la rafale, le temps est adimensionné en longueurs de maquette en prenant la vitesse de la soufflerie 1 comme référence, l'origine des temps correspond à l'ouverture du premier volet.

---

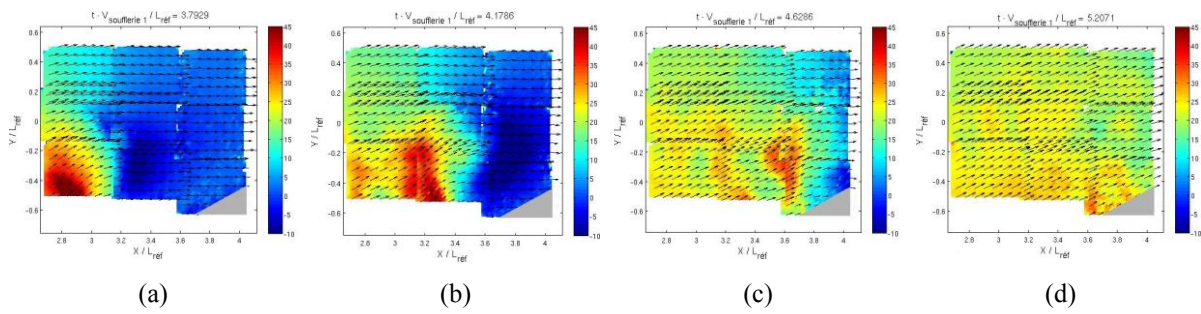


Figure 6: Arrivée du front de la rafale, images PIV de l'angle de dérapage pour différents instants de temps adimensionné. (a) :  $3.79 L_{réf}$ , (b) :  $4.19 L_{réf}$ , (c) :  $4.63 L_{réf}$ , (d)  $5.21 L_{réf}$

Les évolutions temporelles des composantes des vitesses longitudinale et transversale au centre du futur emplacement de la maquette sont présentées en Figure 7; les vitesses sont normalisées par la valeur stationnaire correspondante ( $U_{stationnaire}$  ou  $V_{stationnaire}$ , indiquées par les pointillés).

L'évolution temporelle de la vitesse transversale  $V$  présente un profil en créneau similaire à celui introduit en phase de projet (Figure 3b). Il existe cependant un résidu de vitesse avant et après la rafale en raison d'une d'étanchéité imparfaite du système de volets. La valeur de régime stationnaire est atteinte en environ 1.5 longueurs de maquette, ce qui correspond à 50 ms. L'évolution temporelle de  $U$  présente des effets transitoires importants en début et fin de rafale contrairement aux prévisions (Figure 3b). En tout début de rafale, le fluide provenant de la soufflerie principale est contraint de contourner le front de jet issu de la soufflerie secondaire. Ce contournement est associé à une accélération justifiant le pic de survitesse observé sur la Figure 7. Le déficit de vitesse  $U$  observé en fin de rafale est attribué à la présence d'une masse d'air issue de la soufflerie secondaire qui subsiste encore dans la veine d'essai, bien que plus alimentée. Cette masse d'air introduit une perte de charge vis-à-vis de la soufflerie principale impliquant un ralentissement de l'écoulement longitudinal. Ce phénomène semble donc inhérent au montage et a été observé de même par Ryan (Ryan [2000]).

L'évolution temporelle de l'angle de dérapage associé à ces vitesses est présentée sur la Figure 8. On pourra remarquer que la vitesse transversale est prédominante sur la formation de cet angle (cf Figure 8, courbe bleue), ce qui permet de relativiser les « défauts » de comportement observés pour la vitesse longitudinale. L'angle de dérapage est sondé en trois positions latérales «  $Y$  » pour la même abscisse «  $X$  » correspondant au centre de la future maquette (Figure 8). De manière cohérente aux résultats obtenus en stationnaire, l'angle de dérapage vu dans la phase centrale de la rafale (150 à 400 ms) est d'autant plus élevé que l'on se rapproche du système des volets. On peut aussi observer que la rampe d'augmentation de  $\beta$  est plus forte proche des portes, mais comporte des effets instationnaires associés à des pics jusqu'à 30% plus élevés que la valeur stationnaire. Cette variation correspond à l'ordre de grandeur des efforts aérodynamiques instationnaires mesurés avec maquette propulsée (Beauvais [1967], Baker et Humphreys [1996], Cairns [1994], Chadwick [1999]). Il conviendra donc de placer la maquette à une distance convenable des portes pour ne pas ajouter d'autres effets instationnaires à la mesure des efforts dans la prochaine campagne.

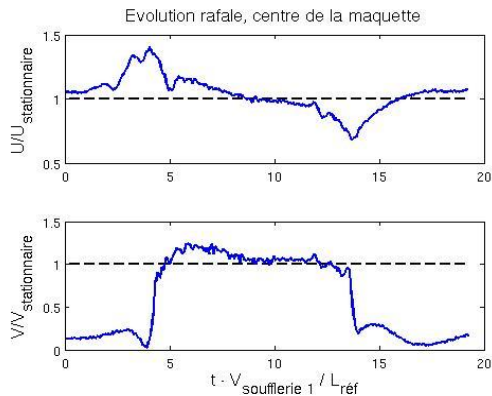


Figure 7: Evolution des composantes de vitesse lors du passage d'une rafale, centre du futur emplacement de la maquette

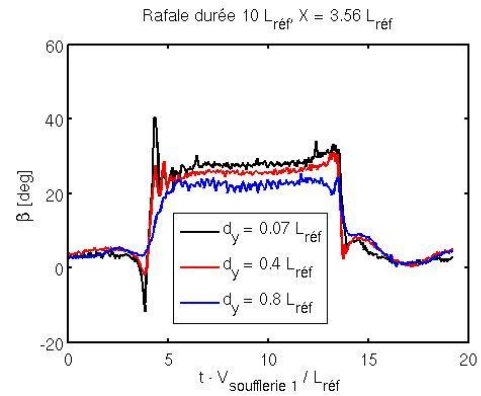


Figure 8: Evolution de l'angle de dérapage lors du passage d'une rafale pour 3 distances du système de portes

## 5. Conclusions et perspectives

Un nouveau banc d'essai reproduisant le passage d'une rafale de vent latéral sur un véhicule a été validé ; couplé à un système de mesure PIV résolue en temps, il permettra d'accéder aux structures instationnaires responsables de l'évolution des efforts aérodynamiques observé sur route lors de tels coups de vent. Les angles de dérapage générés par le système sont compris entre 22 et 27°, valeurs caractéristiques des véhicules à grande vitesse, pour lesquels le risque de renversement est plus élevé. Par ailleurs, le dispositif est capable de passer d'un vent latéral nul à la valeur stationnaire suffisamment rapidement pour considérer le profil résultant un échelon.

Au moment d'écrire ce document, une deuxième campagne expérimentale est en cours de préparation : elle prévoit des mesures couplées d'efforts instationnaires et de PIV résolue en temps. L'analyse de ces mesures donnera des informations sur les structures engendrant les efforts instationnaires et sera confrontée aux résultats disponibles dans la littérature (Ryan et Dominy [2000], Beauvais [1967], Chadwick [1999], Favre et Efraïssom [2011]). Enfin, un modèle numérique permettant de généraliser la configuration étudiée à des nombres de Reynolds plus élevés ou à d'autres angles de dérapage sera développé.

## Références

- 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.
- Baker, C. J., [2010] *The simulation of unsteady aerodynamic cross wind forces on trains*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 98, p. 88 - 99
- Barnard, R., [1996] *Road vehicle aerodynamic design: an introduction*. Longman Publishing Group, p. 211-229.
- Beauvais, F. [1967] *Transient nature of wind gust effects on an automobile*, SAE Paper 670608.



- 
- Cairns, R. S. [1994] *Lateral aerodynamic characteristics of motor vehicles in transient crosswinds*, PhD thesis, Cranfield Inst of Technology.
- Chadwick, A. [1999] *Crosswind aerodynamics of sports utility vehicles*, PhD thesis, Cranfield Inst of Technology.
- Chometon, F., Strzelecki, A., Ferrand, V., Dechipre, H., Dufour, P. C., Gohlke, M., Herbert, V., [2005] *Experimental Study of Unsteady Wakes Behind an Oscillating Car model*, SAE Technical paper 2005-01-0604.
- Cooper, R. [1984] *Atmospheric turbulence with respect to moving ground vehicles*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 17, p. 215 – 238.
- Dominy, R. [1991] *A technique for the investigation of transient aerodynamic forces on road vehicles in cross winds*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 205, p. 245-250.
- Dominy, R., Ryan, A. [1999] *An Improved Wind Tunnel Configuration for the Investigation of Aerodynamic Crosswind Gust Response*, SAE Paper 1999-01-0808.
- Favre, T., Efraimsson, G., [2011] *An Assessment of Detached-Eddy Simulations of Unsteady Crosswind Aerodynamics of Road Vehicles*, Flow, Turbulence and Combustion, Springer Netherlands, Vol. 87, p. 133-163.
- Garry K.P, Cooper K.R, [1998] *Comparison of Quasi-Static and Dynamic Wind Tunnel Measurements on simplified Tractor-Trailer Models*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics”, Vol. 22, p. 185–194.
- Guilmineau, E., Chometon, F. [2009] *Effect of Side Wind on a Simplified Car Model: Experimental and Numerical Analysis*, Journal of Fluids Engineering, Vol. 131.
- Joseph, P., [2008], *Génération de Rafales Latérales*, Mémoire de Master, Université de Bourgogne - ISAT Nevers.
- Krajnovic, S., [2008] *Numerical simulation of the flow around an ICE2 train under the influence of a wind gust*, Proceedings of Railway Engineering - Challenges for Railway Transportation in Information Age (ICRE 2008), International Conference on.
- Macklin, A., Garry, K. P., Howell, J. [1996] *Comparing static and dynamic testing techniques for the crosswind sensitivity of road vehicles*, SAE paper 960674, p. 39-45.
- Mansor, S., Passmore, M.A., [2007] *Estimation of bluff body transient aerodynamics using an oscillating model rig*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 96, p. 1218–1231.
- Masseboeuf, S., [2009] *Génération de rafales latérales en soufflerie*, Mémoire de Master, Université de Bourgogne - ISAT Nevers.
- Passmore M.A., Richardson S., Imam A., [2001] *An experimental study of unsteady vehicle aerodynamics*, Proc Instn Mech Engrs, Vol. 215 part D, p. 779–788.
- Ryan, A. [2000] *The simulation of transient cross-wind gusts and their aerodynamic influence on passenger cars*, PhD thesis, University of Durham.
- Ryan, A., Dominy, R. [2000] *Wake surveys behind a passenger car subjected to a transient cross-wind gust*, SAE Paper 2000-01-0874.
- Sterling, M., Baker, C., Bouferrouk, A., O’Neil, H., Wood, S., Crosbie, E. [2009]. *An investigation of the aerodynamic admittances and aerodynamic weighting functions of trains*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 97, p. 512 - 522.
-