

Contrôle d'écoulement en Aérodynamique automobile

JEAN-LUC AIDER†‡, JEAN-JACQUES LASSERRE†, JEAN-FRANÇOIS BEAUDOIN†, VINCENT HERBERT† & JOSE EDUARDO WESFREID‡

†Equipe "Aérodynamique et Aérothermique"
Direction de la Recherche et de l'Innovation Automobile
PSA Peugeot-Citroën
2, route de Gisy - 78943 Vélizy-Villacoublay

‡Laboratoire Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes
UMR 7636 CNRS - ESPCI - P6 - P7
10, rue Vauquelin 75231 Paris Cedex 5

Résumé :

Nous présentons ici une rapide revue des études que nous avons réalisées sur le thème du contrôle d'écoulement appliqué à l'Aérodynamique Automobile. Nous présentons plusieurs exemples de techniques de contrôle d'écoulement mises en oeuvre sur des formes simplifiées de véhicules (corps de Ahmed) ainsi que sur des véhicules séries et des concept-cars. Deux stratégies de contrôle seront plus particulièrement développées. La première consiste à contrôler l'écoulement au point de décollement à l'aide de déflecteurs mobiles situés le long des arêtes entourant le culot d'un corps de Ahmed. La seconde consiste à contrôler la couche limite en amont du point de décollement à l'aide d'un système de générateurs de vortex actifs. Dans les deux cas nous présenterons à la fois des résultats en termes de réduction des forces aérodynamiques et à la fois en termes de modification de la structure du sillage proche du corps de Ahmed. Nous présenterons également des résultats démontrant l'efficacité du système de générateurs de vortex actif sur des véhicules échelle 1. D'autres systèmes de contrôle d'écoulement intégrés sur des concept-cars échelle 1 seront également rapidement présentés.

Abstract :

In this paper, we present a short review of our recent work on flow control applied to automotive aerodynamics. Various experimental studies were carried out on different 3D bluff-bodies, from classic or modified Ahmed bluff-body to concept-cars (Citroën C-SportLounge and C-Airlounge) or real road vehicles (Citroën C4). Many different strategies have been tested but we will focus on two types of actuators : the first is a moving flap located along the sides edges of the rear of the bluff body, while the second is an active vortex generators device located upstream of the separated flow. Other devices have been validated and will be illustrated through integration in real vehicles.

Mots clefs : Aérodynamique Automobile ; Bluff body ; Contrôle des écoulements décollés

1 Introduction

Les forces aérodynamiques subies par un véhicule automobile sont majoritairement dues aux écoulements décollés qui apparaissent tout autour du véhicule et plus particulièrement le sillage 3D généré sur son culot [1]. D'une manière générale, deux stratégies sont envisageables pour améliorer les performances aérodynamiques d'un véhicule automobile : l'optimisation de forme ou le contrôle d'écoulement. L'optimisation de formes consistera à modifier localement la forme, la définition géométrique de la région siège du décollement, tout en respectant certaines contraintes fixées par le système. C'est, par exemple, la méthode utilisée actuellement par les ingénieurs en Aérodynamique Automobile : en fonction des mesures de forces aérodynamiques et de quelques informations sur la nature de l'écoulement dans les régions critiques, on modifiera localement un rayon de courbure ou un angle de lunette pour tenter d'améliorer le coefficient aérodynamique. On comprendra qu'il ne s'agit pas à proprement parlé d'"optimisation", mais plutôt d'améliorations basées sur un retour d'expérience.

Une stratégie intermédiaire peut consister à réellement mettre en oeuvre des algorithmes d'optimisation pour chercher cette fois rigoureusement la meilleure définition géométrique par rapport à un objectif fixé au préalable (traînée minimum dans le cas de l'aérodynamique automobile). Bien-sûr cette démarche n'est possible que dans le cas d'études numériques. On peut citer ici le travail de [2] dans lequel les auteurs ont cherché à optimiser le coefficient de traînée d'un bluff-body dont la géométrie était basée sur une CAO paramétrée.

Si l'on ne veut pas modifier la forme du véhicule, ou si l'on veut améliorer davantage les performances aérodynamiques d'un véhicule déjà optimisé, il faut alors contrôler les écoulements décollés à l'aide d'actionneurs. Si on veut contrôler la bulle de recirculation générée sur l'arrière d'un véhicule, on peut envisager quatre approches très différentes. On peut ainsi :

- contrôler la couche limite en amont du décollement,
- contrôler l'écoulement au point de décollement,
- contrôler l'écoulement en paroi en aval du point de décollement,
- contrôler l'écoulement dans le volume en aval du point de décollement.

Chacune de ces approches repose sur des propriétés très différentes de l'écoulement décollé ce qui implique des actionneurs et des stratégies adaptées. Nous allons par la suite essentiellement illustrer des stratégies de contrôle en amont ou au point de décollement. Par ailleurs, il faut prendre en compte le fait que l'on cherche à contrôler un sillage 3D, et non pas seulement un écoulement décollé, dans la stratégie de contrôle que l'on cherche. Les interactions fortes entre les différentes structures générées dans le sillage proche du véhicule peuvent être à l'origine de stratégies inattendues du point de vue du contrôle des écoulements décollés qui repose en général sur l'idée que l'on peut réduire la force de traînée subie par un objet en repoussant le point de décollement.

Dans cette présentation, nous illustrerons plusieurs stratégies de contrôle très différentes mises en oeuvre sur des formes très simplifiées de véhicules (corps de Ahmed), mais aussi sur des véhicules série ou des concept-cars.

2 Corps 3D non profilés et méthodes expérimentales

Le corps 3D non profilé, ou bluff body, utilisés couramment en Aérodynamique Automobile est le corps de Ahmed [3] qui permet de reproduire assez fidèlement la structure du sillage proche d'un véhicule (figure 1 - a) qui est le siège d'une compétition entre bulle de recirculation, tourbillons longitudinaux et recirculation torique. Afin de ne plus fixer géométriquement le lieu du décollement sur la lunette arrière, nous avons proposé une variante du corps de Ahmed avec une lunette arrière arrondie (figure 1 -b). Tous les essais sur corps de Ahmed ont été réalisés à la soufflerie de PSA Peugeot-Citroën de La Ferté Vidame [4]. Les essais sur véhicule échelle 1 ont tous été réalisés dans la soufflerie S4 de l'IAT Saint-Cyr. Nous présenterons ici des mesures de traînée (SC_x), de portance (SC_z) ainsi que des mesures de champs de vitesse obtenues par PIV (Particle Image Velocimetry) qui nous permettront d'associer une modification de force à une modification de la structure du sillage proche du corps 3D.

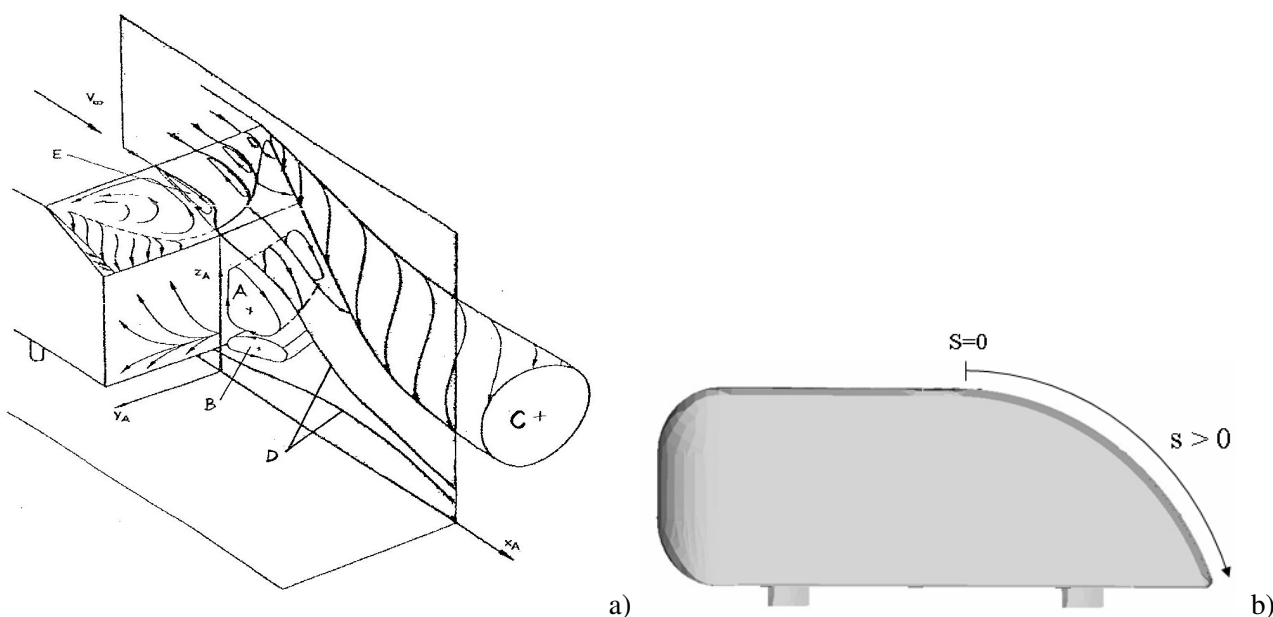


FIG. 1 – (a) Vue schématique de l'arrière du corps de Ahmed (angle de lunette arrière de 30°) et du sillage proche où coexistent bulle de recirculation, tourbillons longitudinaux et tore de recirculation ([3]). (b) Corps de Ahmed avec un lunette arrière arrondie pour ne plus imposer géométriquement le point de décollement.

3 Contrôle par déflecteur aux points de décollement

Nous illustrons ici la stratégie de contrôle la plus intuitive et la plus classique, à savoir le contrôle aux points de décollements. Nous avons utilisés des déflecteurs sur les différentes arêtes entourant l'arrière du corps de Ahmed équipé d'une lunette arrière faisant un angle de 30° par rapport à l'horizontale. Nous proposons ici une

version plus élaborée puisque nous utilisons des déflecteurs pilotés. L'avantage est double : le système n'est utilisé que si nécessaire et nous pouvons piloter l'angle de sortie pour optimiser le gain aérodynamique [5]. Au total, sept déflecteurs ont été installés sur l'arrière du corps de Ahmed. Une étude paramétrique systématique a été réalisée sur chacune des configurations numérotées sur la figure 2, mais aussi sur des combinaisons entre ses différentes configurations élémentaires. Les résultats sont résumés sur les tableaux 1 et 2. Il apparaît clairement que le déflecteur de montant de baie arrière est le plus performant avec un gain de près de 18% de C_x pour un gain de 82% de C_z . En combinant les meilleures configurations (1 + 2 + 3 + 4 + 5), nous avons pu obtenir jusqu'à plus de 25% de gain en traînée pour un gain supérieur à 100% en portance (force inversée). Ces résultats démontrent tout le potentiel de cette stratégie de contrôle d'écoulement. Ces mesures de force ont par ailleurs été accompagnées de mesures PIV dans différents plans qui démontraient en particulier l'effet important des déflecteurs de montant de baie arrière sur les tourbillons longitudinaux [4].

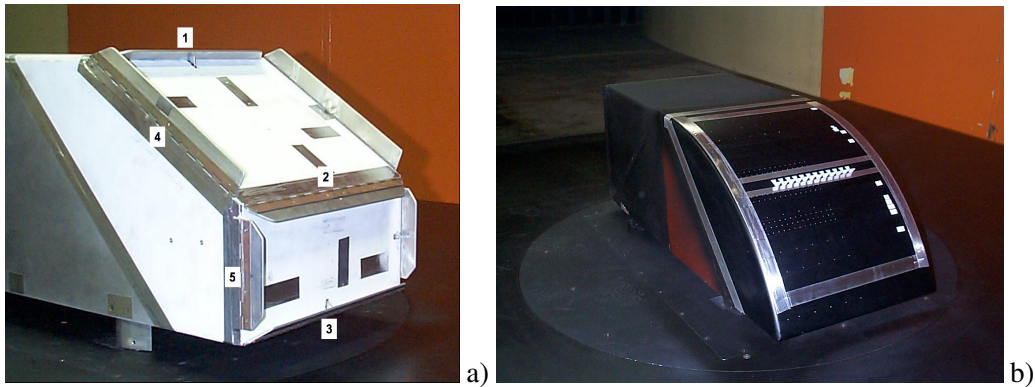


FIG. 2 – a) Vue de l'arrière du corps de Ahmed équipé de sept déflecteurs pilotés sur chacune des arêtes. Les numéros indiquent les différentes configurations qui ont été testées. b) Vue arrière du corps Ahmed avec lunette arrondie équipée d'un système de générateurs de vortex pilotés.

Configuration	ΔC_x (%)	α_{opt}	ΔC_z (%)	α_{opt}
Montants de baie arrière (configuration 4)	-0.062 (-17.7%)	75°	-0.423 (-82%)	75°
Becquet (configuration 1)	-0.054 (-15%)	25°	-0.528 (-114%)	52°
Arête supérieure du culot (configuration 2)	-0.024 (-7%)	95°	-0.077 (-12%)	95°
Arête inférieure du culot (configuration 3)	-0.014 (-4%)	80°	-0.069 (-17%)	80°
Arêtes latérales du culot (configuration 5)	-0.01 (-3%)	77°	-0.004 (-1%)	77°

TAB. 1 – Résumé des gains les plus importants en C_x et C_z obtenus avec les différentes configurations numérotées sur la figure 2 pour $U_o = 40m/s$. α_{opt} est l'angle entre le déflecteur et la paroi, la référence $\alpha = 0$ correspondant aux déflecteurs rabattus sur la lunette arrière et le culot.

Configuration number	ΔC_x (%)	ΔC_z (%)
6 (configurations 1 et 4)	-0.073 (-20.7%)	-0.435 (-94.3%)
7 (configurations 4 et 2)	-0.031 (-8.9%)	-0.129 (-26.2%)
8 (configurations 3 et 5)	-0.025 (-7.1%)	-0.084 (-18.3%)
9 (configurations 2, 3 et 5)	-0.044 (-12.4%)	-0.210 (-46.7%)
10 (configurations 4, 3 et 5)	-0.079 (-22.4%)	-0.496 (-107.4%)
11 (configurations 1, 2, 3, 4 et 5)	-0.089 (-25.2%)	-0.488 (-105.7%)

TAB. 2 – Best drag and lift reductions (shown as drag count and percentage) obtained with the different combinations of flaps for $U_o = 40m/s$.

U_o ($m.s^{-1}$)	ΔC_x (%) VGs (becquet)	ΔC_z (%) VGs (becquet)	ΔC_{zAr} (%) VGs (becquet)
20	-14 (-6.3)	-44.4 (-62.8)	-89.4 (-107.3)
30	-11.3 (-0.3)	-38.4 (-57.8)	-92.2 (-107.5)
40	-10.6 (+2.88)	-39.0 (-52.8)	-99.2 (-109)

TAB. 3 – Gains maximum de traînée C_x , de portance C_z et de portance arrière C_{zAr} obtenus pour trois vitesses d'écoulement principal U_o différentes. Par souci de comparaison, les gains obtenus avec un becquet sont également présentés.

4 Contrôle par générateurs de vortex en amont du point de décollement

L'objectif est ici de contrôler l'écoulement décollé en amont d'un point de décollement qui n'est pas forcé géométriquement, comme c'est le cas pour le corps de Ahmed avec lunette arrière arrondie (figure 1-b). Pour ce faire nous utilisons des générateurs de vortex de forme trapézoïdale comme représentés sur la figure 3. Une étude paramétrique détaillée a été menée en faisant varier, en particulier, l'angle α et l'espacement λ . Les gains maximum de C_x et C_z obtenus sont résumés dans le tableau 3. Comme on peut le voir les gains sont significatifs et plus importants (en particulier pour la traînée) que ceux obtenus avec un becquet.

Nous avons réalisé des mesures PIV du champs de vitesse dans le plan de symétrie $y = 0$ pour différentes configurations. Nous représentons sur la figure 4 les résultats obtenus pour l'écoulement de référence non contrôlé ($C_x = 0.315$ figure 4-a) et contrôlé ($C_x = 0.280$ figure 4-b). La réduction de traînée est ici clairement associée à une augmentation de la taille de la bulle de recirculation. Nous avons pu montrer à l'aide de mesures complémentaires dans une section transversale dans le sillage proche du corps de Ahmed que l'augmentation de la bulle de recirculation est associée à une forte réduction de l'intensité (mesurée à travers la circulation Γ) des tourbillons longitudinaux [6].

Nous avons pu équiper le corps de Ahmed d'un système de générateurs de vortex motorisé qui permet de piloter l'angle $\alpha(I)$ en fonction d'une consigne I calculée à l'aide d'un algorithme d'extremum seeking. Le système a ainsi pu être utilisé en boucle fermée [7] sur la base d'une information donnée par un capteur de pression pariétale situé en aval de la ligne de générateurs de vortex.

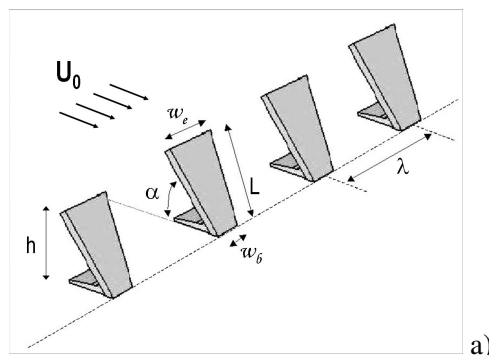


FIG. 3 – a) Générateurs de vortex utilisés pour contrôler l'écoulement sur l'arrière du corps de Ahmed arrondi. Ce sont des ailettes trapézoïdales dont on peut faire varier l'angle α qui est un paramètre de contrôle, ce qui permet de les utiliser dans une boucle de contrôle réactif [7].

5 Contrôle sur véhicule série et concept-car

5.1 Intégration de générateurs de vortex pilotés dans un véhicule série

Le système de générateurs de vortex "actifs" a également été intégré et testé sur un véhicule série (Citroën C4 berline). Nous avons ainsi pu vérifier l'efficacité des générateurs de vortex sur un véhicule non simplifié et échelle 1 (taille réelle) : nous retrouvons des gains de 14% en SC_x et de 100% en SC_z . Nous avons également réalisé des mesures PIV dans le sillage proche du véhicule (figure 5) dans deux plans verticaux. L'effet sur le sillage proche du véhicule est le même que sur le corps de Ahmed : une augmentation de la taille de la bulle de recirculation sur la lunette arrière et un affaiblissement des tourbillons longitudinaux. Les générateurs de vortex sont ici pilotés en fonction de la vitesse du véhicule et en fonction de la grandeur à minimiser (SC_x ou SC_z). Un exemple d'intégration dans le concept-car C-AirLounge est illustré sur la figure 6-a.

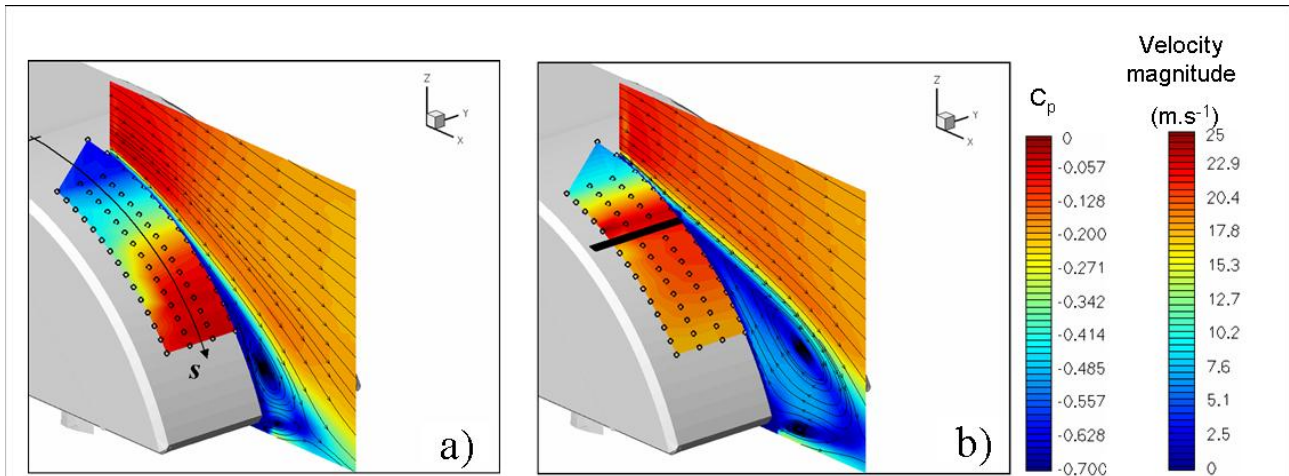


FIG. 4 – Modification par les générateurs de vortex de la bulle recirculation (mesure du module de la vitesse dans le plan de symétrie $y = 0$) et de la distribution de pression pariétale créées sur la lunette arrière du corps de Ahmed arrondi pour pour $U_o = 20m/s$. a) Cas non contrôlé. b) Cas contrôlé. Le trait noir épais indique la position de la ligne de générateurs de vortex.

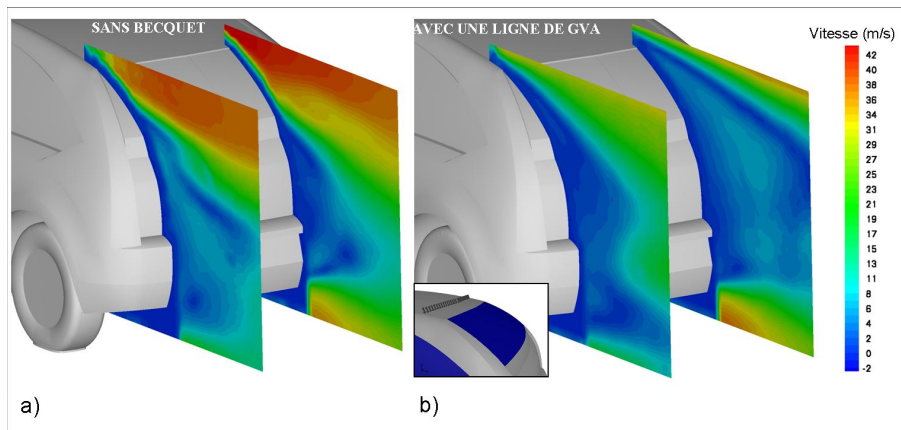


FIG. 5 – Modification du sillage d'une C4 berline par une ligne de BVG : champ de vitesse obtenu par PIV sur la configuration de référence sans BVGs (a) et avec BVGs (b). Les gains obtenus avec les générateurs de vortex sont de 14% en SC_x et 100% en SC_z .

5.2 Autres systèmes de contrôle d'écoulement et perspectives

De nombreuses autres techniques de contrôle ont également été testées puis intégrées sur la C4 berline et/ou sur les concept-cars C-SportLounge et C-AirLounge. Nous présenterons un résumé des différentes solutions que nous avons pu développer. En effet, le seul contrôle de l'écoulement décollé en fin de pavillon n'est pas suffisant pour assurer un gain significatif ou n'est pas toujours possible. Il faut donc disposer d'alternatives. On peut par exemple s'intéresser à l'écoulement sous le véhicule qui va interagir avec l'écoulement au-dessus du véhicule à travers la bulle de recirculation. Ceci est possible avec un aileron piloté (figure 6-b) qui est déployé si besoin sous le diffuseur arrière. Son utilisation avec un système de générateurs de vortex comme ceux présentés précédemment permet un gain supplémentaire de traînée de l'ordre de 3%.

Enfin, il apparaît clairement que l'application du contrôle d'écoulement à l'Aérodynamique Automobile est un exercice difficile car extrêmement contraint : il existe très peu d'espaces disponibles sur un véhicule moderne ce qui pose le problème de l'intégration des systèmes de contrôle. Les dimensions, la masse, la consommation d'énergie et le coût des systèmes sont autant de critères de sélection incontournables lorsqu'on envisage une application véhicule. Il apparaît indispensable d'utiliser des actionneurs miniaturisés, ou encore micro-actionneurs. Les MEMS (Micro Electro Mechanical Systems), et en particulier les micro-jets pulsés [8], répondent au cahier des charges exigeants des industriels mais aussi des expérimentateurs. Ils devraient permettre d'équiper des véhicules, mais aussi d'instrumenter plus facilement des parois courbes ou complexes ou encore d'envisager du contrôle distribué et à petite échelle.

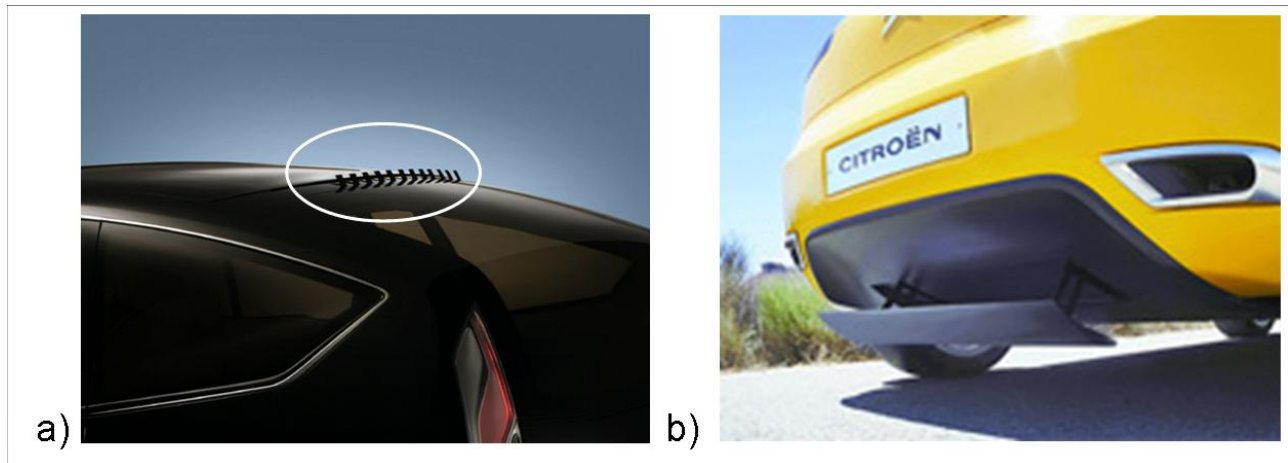


FIG. 6 – Vue de derrière (a) du pavillon du concept-car Citroën C-Airlounge (2003) dans lequel une ligne de générateurs de vortex à été intégrée (zone en fin de pavillon entourée en blanc sur la photo). Vue de derrière du diffuseur arrière du concept-car Citroën C-Sportlounge (2005) qui est équipé d'un aileron mobile que l'on montre en position déployée au maximum (b). Cet aileron est piloté en fonction de la vitesse et des conditions de conduite (position freinage d'urgence en plus du pilotage en vitesse stabilisée).

6 Conclusions

De nombreuses solutions de contrôle d'écoulement ont pu être testées et validées tant sur des corps 3D non profilés échelle réduite que sur des véhicules complets échelle 1. En particulier des solutions innovantes tels les générateurs de vortex actifs ont été étudiés en détail à partir de mesures PIV ce qui a permis de comprendre pourquoi certaines configurations se sont révélées plus performantes que d'autres. Des gains significatifs en traînée et portance sont clairement possible avec ce type de systèmes et, plus encore, avec une combinaison de systèmes de contrôle d'écoulement agissant sur différents écoulements autour de différentes zones du véhicule (face avant, culot, passages de roues, etc.). Néanmoins un constat s'impose : si ces systèmes sont efficaces, leurs dimensions restent un frein à leur application et exploitation industrielle. Une étape nouvelle apparaît maintenant nécessaire : la miniaturisation des actionneurs. L'avenir du contrôle d'écoulement en Aérodynamique Automobile passe très certainement par l'utilisation d'actionneurs MEMS, seuls capables d'allier compacité, faible masse, faible consommation et faible coût qui sont autant de conditions "sine qua non" pour une éventuelle application sur les futurs véhicules série.

Références

- [1] Hucho W. H. Aerodynamics of road vehicles. Cambridge University Press, 1998. Cambridge.
- [2] Muyl F., Dumas L., and Herbert V. Hybrid method for aerodynamic shape optimization in automotive industry. *Comp. and Fluids*, 33(5-6), 849–858, 2004.
- [3] Ahmed S. R. Influence of base slant on the wake structure and drag of road vehicles. *J. Fluids Eng.*, **105**, 429–434, 1983.
- [4] Aider J. L. and Beaudoin J. F. Reduction of the drag and lift of a 3d bluff body using flaps. *Exp. Fluids*, 44(4), 491–501, 2008.
- [5] Lasserre J. J., Aider J. L., and Després C. Déflecteurs mobiles pour réduire la traînée et la portance d'une automobile - Mobile flaps to reduce the drag and lift of a road vehicle. *Patent FR 03.05919*, PSA Peugeot-Citroën, 2003.
- [6] Aider J. L., Beaudoin J. F., and Wesfreid J. E. Flow control over a 3d bluff body using vortex generators. *Exp. Fluids*, 2009.
- [7] Beaudoin J. F., Cadot O., Aider J. L., and Wesfreid J. E. Drag reduction of a 3d bluff body by closed loop control using oscillating vortex generators and wall pressure measurement. In Morrison J., Jonathan F., Birch D. M., and Lavoie P., editors, *Proceedings of the IUTAM Symposium on Flow Control and MEMS*, London, United-Kingdom, 2006, volume 7 of *IUTAM Bookseries*. Springer, 2008.
- [8] Aider J. L., Harambat F., Lasserre J. J., Beaudoin J. F., and Edouard C. 13. characterization of the flow induced by mems pulsed micro-jets with large nozzle. In Morrison J., Jonathan F., Birch D. M., and Lavoie P., editors, *Proceedings of the IUTAM Symposium on Flow Control and MEMS*, London, United-Kingdom, 2006, volume 7 of *IUTAM Bookseries*. Springer, 2008.