

Analyse de l'influence du contrôle des tourbillons longitudinaux de montants de baie sur les champs de pression pariétale en aérodynamique automobile

^{1,2}Benjamin Lehueur, ¹Patrick Gilliéron, ²Loc Ta-Phuoc

¹Renault, Direction des Techniques Avancées Automobiles, Groupe Mécanique des Fluides et Aérodynamique
1, Avenue du Golf, 78288 Guyancourt cedex.
benjamin.lehueur@renault.com

²Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur- CNRS
Université de Paris Sud, 91403 ORSAY

Résumé :

L'influence du contrôle des structures tourbillonnaires longitudinales qui prennent naissance au niveau des montants de baie d'une géométrie simplifiée de véhicule automobile est analysée à partir d'une approche numérique tridimensionnelle instationnaire. Le contrôle s'effectue à l'aide de techniques de soufflage et d'aspiration au niveau de l'arête latérale du pare-brise et l'analyse est réalisée à partir des champs de pression pariétale relevés au voisinage de la structure tourbillonnaire longitudinale de montant de baie. Les résultats montrent que le soufflage provoque l'éclatement tourbillonnaire et augmente de manière significative les fluctuations de pression statique au niveau de la partie latérale de la géométrie. Le contrôle par aspiration permet de supprimer la structure tourbillonnaire par recollement et diminue l'intensité des variations de pression. Le travail présenté ici permet enfin d'identifier des préconisations pour réduire la traînée et le bruit d'origine aérodynamique associés aux tourbillons longitudinaux de montants de baie.

Abstract :

The analysis of the control of the longitudinal vortices generated by flow separation around the A-pillars on a simplified car geometry is carried out by an unsteady numerical approach. The control consists in blowing and suction techniques around the A-pillars and the study is performed according to static pressure fields noted in the vicinity of the longitudinal vortices. The results show that the blowing technique along the lateral edge of the windshield promotes vortex breakdown and increases the pressure fluctuations on the lateral part of the car geometry. The suction technique tends to suppress the longitudinal vortex by reattachment and decreases the magnitude of pressure variations. Finally the present work allows to identify new solutions in order to reduce the total drag and the aerodynamic noise related to the A-pillar vortices.

Mots clefs : Aérodynamique automobile, tourbillons longitudinaux, soufflage/aspiration.

1 Introduction – Objectif de l'étude

Les objectifs de réduction de la consommation et d'émission de gaz polluants ou à effet de serre définis lors du protocole de Kyoto et entrés en vigueur en février 2005, couplés à des objectifs d'amélioration de la stabilité dynamique du véhicule, encouragent les constructeurs automobile à s'intéresser à des solutions de contrôle de l'écoulement en proche paroi pour limiter le développement des structures tourbillonnaires décollées. En dehors des techniques traditionnelles de contrôle passif, actuellement utilisées lors des phases de développement des nouveaux véhicules automobile, de nouvelles solutions de contrôle actif sont développées au sein des laboratoires universitaire et industriel à partir de techniques de soufflage et/ou aspiration [1]. Ainsi, le contrôle par aspiration des structures tourbillonnaires longitudinales qui se développent au niveau de l'arête latérale du pare-brise permet de diminuer les pertes d'énergie volumique associées et ainsi de réduire la traînée aérodynamique d'environ 14% [2]. Les solutions de contrôle par

soufflage ou par aspiration modifient cependant de manière significative la topologie des tourbillons longitudinaux de pare-brise et la distribution de pression statique pariétale au niveau de la partie latérale du véhicule. Le contrôle peut ainsi avoir un impact sur la répartition du champ instationnaire des fluctuations de pressions statiques, influencer les mécanismes de production de bruit au voisinage des vitres latérales et dégrader les performances aéro-acoustiques du véhicule.

Dans ce contexte, le travail présenté ici consiste, d'une part, à analyser l'impact du contrôle par soufflage et/ou aspiration des tourbillons longitudinaux de pare-brise sur les pressions instantanées distribuées sur la surface d'une géométrie simplifiée de véhicule automobile et, d'autre part, identifier des préconisations de contrôle pour réduire la traînée aérodynamique sans dégrader la prestation acoustique des véhicules. Pour atteindre ce double objectif, une simulation numérique 3D instationnaire est mise en place à partir des travaux de Lehugeur *et al* [2] pour réduire la traînée associée au tourbillons longitudinaux de pare-brise à l'aide de techniques de contrôle par soufflage et aspiration.

2 Rappels bibliographiques

La topologie de l'écoulement d'air au voisinage d'un montant de baie est dominée par une structure tourbillonnaire longitudinale qui prend naissance au niveau de l'arête latérale du pare-brise, se développe, est transportée puis dissipée dans le sillage. Cette structure reste attachée sur tout ou partie des faces latérales et interagit directement avec la paroi.

Les tourbillons longitudinaux de montant de baie constituent également une source importante de bruit aérodynamique et font l'objet de nombreuses études aéro-acoustiques, Hucho [3]. Des résultats d'essais expérimentaux et de simulations numériques obtenus par Arguillat *et al* [4] montrent que l'écoulement tourbillonnaire au voisinage des montants de baie est associé à des fluctuations importantes de vitesse et pression qui contribuent aux mécanismes de production de bruit au niveau des parties latérales du véhicule. Dans la perspective de contrôler la stabilité dynamique et réduire la traînée des véhicules automobiles, Lehugeur *et al* [2] réalisent une étude numérique du contrôle par soufflage ou aspiration au niveau des arêtes latérales d'une géométrie simplifiée de pare-brise. Le contrôle par soufflage permet d'augmenter le nombre de Swirl de la structure tourbillonnaire longitudinale, provoque l'éclatement tourbillonnaire mais accroît les dimensions transversales du sillage et augmente la traînée aérodynamique. A l'inverse, le contrôle par aspiration permet de supprimer le tourbillon longitudinal par recollement au niveau de la partie latérale de la géométrie et la traînée aérodynamique diminue de 14% pour une vitesse d'aspiration égale à la vitesse infinie amont. Aucune analyse ne permet cependant de quantifier l'impact du contrôle sur les caractéristiques aéro-acoustiques du modèle.

Les travaux présentés ici constituent un prolongement des travaux de Lehugeur *et al* [2] et consistent à analyser les caractéristiques statistiques des fluctuations de pression à la paroi du modèle sans et avec contrôle par soufflage et aspiration au niveau des montants de baie.

3 Cas d'étude

La géométrie d'étude, la simulation numérique et les outils d'analyses sont présentés dans les développements qui suivent.

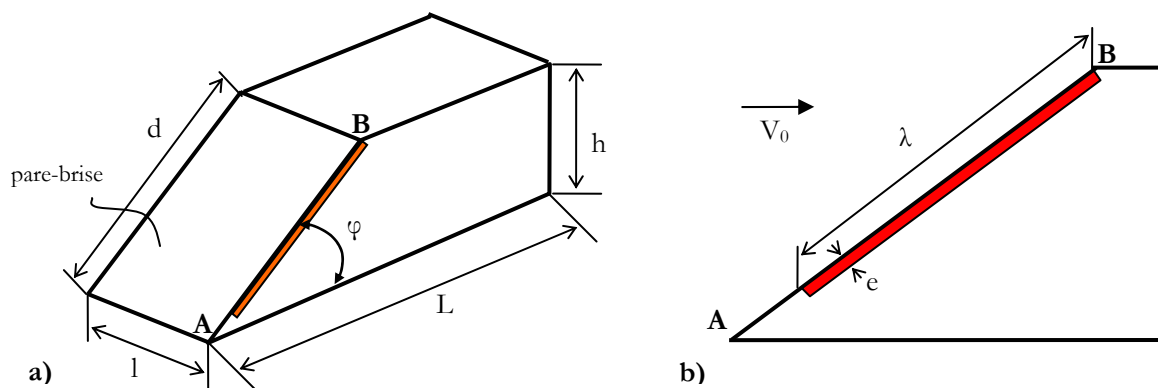


Fig. 1. a) Géométrie d'étude. b) Détails de l'orifice de soufflage/aspiration, vue latérale.

3.1 Géométrie étudiée

L'étude s'effectue à partir d'une géométrie, constituée de surfaces planes, qui modélise la partie avant simplifiée d'un véhicule automobile (figure 1a). Pour une longueur L du modèle égale à 0,17m, la hauteur h et la largeur l de la géométrie sont données par : $h/L=0,23$ et $l/L=0,30$. Les faces supérieure et latérales de la géométrie s'identifient respectivement au pavillon et aux parties latérales d'un véhicule automobile. La face inclinée, de longueur d tel que $d/L=0,47$, représente le pare-brise du véhicule et fait un angle $\varphi=30^\circ$ avec l'horizontale (figure 1a).

Le contrôle de la structure tourbillonnaire qui prend naissance au voisinage du montant de baie s'obtient par soufflage ou aspiration à travers une fente rectangulaire positionnée sur la face latérale de la géométrie au niveau de l'arête latérale AB du pare-brise (figure 1b). La longueur λ et la largeur e de chaque fente valent respectivement $\lambda/d=0,93$ et $e/d=5 \times 10^{-3}$. La vitesse du fluide soufflé V_s ou aspiré V_a à travers la fente est constante, égale à la vitesse infinie amont V_0 , uniforme et normale à la face latérale de la maquette.

3.2 Simulation numérique

Les expérimentations numériques s'effectuent à l'aide d'une approche Boltzmann sur réseaux instationnaire [5] associée à un modèle de turbulence $k-\epsilon$ RNG [6] et une loi de paroi logarithmique. Le domaine de calcul s'identifie à un parallélépipède rectangle qui représente la veine carrée du tunnel hydraulique de l'ONERA de Lille ("Tunnel B") et le calcul numérique consiste à simuler un écoulement d'eau autour de la géométrie d'étude. La longueur et la section carrée du domaine de calcul sont respectivement égales à 2m et 0,09m². La géométrie simplifiée de pare-brise est placée au centre du domaine de calcul pour minimiser l'influence des parois latérales.

L'écoulement modélisé est à compressibilité évanescence, la vitesse initiale V_0 et la pression statique initiale P_0 respectivement égales à 1 m.s⁻¹ et 10⁵ Pa et le taux de turbulence de l'écoulement non perturbé égal à 1%. Dans ces conditions, le nombre de Reynolds rapporté à la longueur de la géométrie est voisin de 2.10⁵. Le maillage surfacique est composé d'éléments de type triangle et le nombre de mailles distribuées sur la géométrie est proche de 2,7.10⁵. La densité du maillage volumique évolue par domaines parallélépipédiques et diminue lorsque la distance à la paroi augmente. Les domaines de plus forte résolution sont situés au voisinage des arêtes latérales du pare-brise. Dans cette région, la distance entre deux nœuds consécutifs est égale à 10⁻⁴ m. La résolution spatiale ainsi introduite correspond à des valeurs de y^+ comprises entre 15 et 21 relevées au niveau des arêtes latérales de pare-brise. Le nombre d'éléments volumiques dans le domaine de calcul est alors proche de 4.10⁶.

La géométrie, le maillage et les conditions aux limites de l'étude étant symétriques, l'analyse porte sur un seul tourbillon longitudinal, associé à l'arête latérale droite du pare-brise, vue de l'avant.

3.3 Outils d'analyse

Dans la suite du document, l'analyse de l'influence du contrôle par soufflage et aspiration sur le champ de pression statique instantané au voisinage de la structure tourbillonnaire longitudinale est tout d'abord réalisée à l'aide de cartographies pariétales des fluctuations de pression statique p' (Pa) et de la pression quadratique moyenne P_{RMS} (Pa).

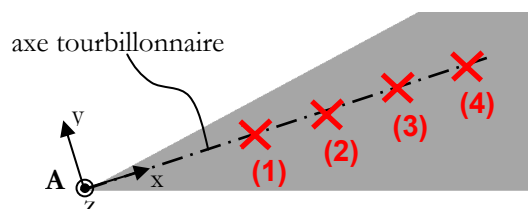


Fig. 2. Position des 4 sondes de pression au niveau de la paroi latérale de la géométrie.

Une analyse fréquentielle du champ de pression statique est ensuite réalisée à l'aide de quatre sondes positionnées sur la paroi de la géométrie suivant une projection latérale de l'axe tourbillonnaire (figure 2, croix rouges). Les positions des sondes sont repérées par rapport au repère (x,y,z) défini tel que l'axe x soit aligné avec la position moyenne de l'axe de la structure tourbillonnaire longitudinale, donnée par Lehugeur *et al* [2]. Dans ce repère (origine en A), les positions des quatre sondes sont respectivement associées aux

abscisses réduites $x/d=0,47, 0,66, 0,87$ et $1,06$. La géométrie des sondes pariétales est circulaire et leur rayon réduit est égal à $r/d=1,25 \cdot 10^{-2}$. La fréquence d'échantillonnage du signal de pression, voisine de 10495 Hz, correspond à une période d'acquisition proche de $9,52 \cdot 10^{-5}$ s. L'analyse est réalisée à l'aide d'une représentation fréquentielle de la densité spectrale d'énergie du signal de pression (DSE). La DSE est couramment utilisée en traitement du signal pour représenter l'intensité d'un signal [7].

4 Analyse des résultats

4.1 Analyse du champ de pression statique fluctuante

Les cartographies instantanées des champs de pression statique fluctuante p' relevées à l'instant $t_1=1,2s$ (date de début de convergence des calculs), au niveau de la paroi latérale de la géométrie d'étude, sont respectivement reportés figure 3a, b et c respectivement pour les configurations sans contrôle, avec soufflage et avec aspiration.

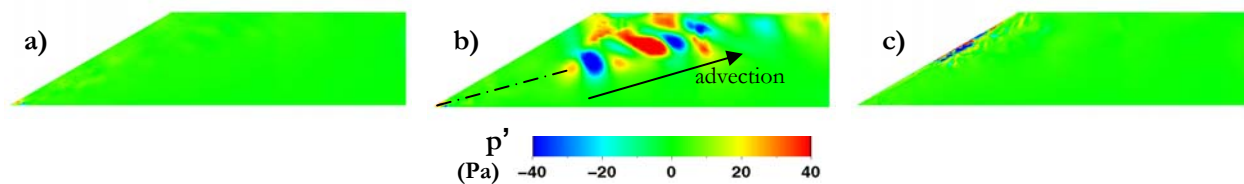


Fig. 3. Répartition pariétale des pressions statiques fluctuantes p' sur la face latérale de la géométrie à l'instant $t_1=1,2s$. a) sans contrôle, b) avec soufflage, c) avec aspiration.

Pour la configuration sans contrôle, la cartographie reportée figure 3a montre que l'amplitude des maxima de pression statique fluctuante relevée au voisinage du cœur tourbillonnaire est inférieure à 10 Pa. Lorsque le contrôle par soufflage est appliqué, la structure tourbillonnaire éclate [2] et les résultats reportés figure 3b montrent que l'éclatement tourbillonnaire est associé à de fortes fluctuations du champ de pression. Les extrema de pression statique fluctuante relevés sont voisins de -50 Pa et $+55$ Pa. L'évolution temporelle du champ pariétal de pression statique fluctuante met de plus en évidence l'apparition alternative, au voisinage de l'axe tourbillonnaire, de structures associées à des variations de pression statique de signes opposés (dépressions et surpressions, figure 3b). La fréquence d'apparition de ces structures est voisine de 19 Hz. Elle est ensuite transportées vers l'aval avec une vitesse d'advection proche de $0,66V_0$, puis semblent se dissiper à proximité de la partie supérieure du culot de la géométrie. Enfin pour les cas d'aspiration, la structure tourbillonnaire est supprimée par recollement au niveau de la surface latérale de la géométrie [2] et des fluctuations de pression statique, d'amplitude voisine de 30 Pa, sont relevées au voisinage immédiat de la fente d'aspiration, figure 3c.

4.2 Analyse du champ de pression quadratique moyenne

L'analyse des cartographies du champ de pression quadratique moyenne P_{RMS} reporté figures 4a, b et c permet de caractériser les régions pariétales soumises à de fortes variations de pression et ainsi d'identifier les sources aéro-acoustiques de l'écoulement [4].

Pour le cas non contrôlé, l'analyse de la répartition pariétale de la pression quadratique moyenne reportée figure 4a permet d'identifier le cœur de la structure tourbillonnaire longitudinale associée à des valeurs de P_{RMS} proche de 12 Pa, au voisinage de l'apex de la géométrie. Pour le cas avec soufflage, l'apparition d'une zone de recirculation associée à l'éclatement tourbillonnaire se traduit par une augmentation rapide de la pression quadratique moyenne au voisinage du point O aligné avec l'axe tourbillonnaire et localisé à l'abscisse réduite $x_O/d=0,84$, figure 4b. Ce résultat suggère que le point O s'identifie au point d'arrêt associé à l'éclatement tourbillonnaire repéré par Lehugeur *et al* à l'abscisse réduite $x/d=0,83$ [2]. En amont du point O et au voisinage de l'axe tourbillonnaire figure 4b, les valeurs de la pression quadratique moyenne P_{RMS} sont voisines de 10 Pa ; en aval du point O, ces valeurs deviennent maximales, de l'ordre de 70 Pa. Cette forte augmentation des pressions quadratiques moyennes constitue ainsi un critère pour mettre en évidence l'apparition du phénomène d'éclatement tourbillonnaire. Pour la configuration d'aspiration, les valeurs maximales de P_{RMS} relevées sur la cartographie reportée figure 4c sont

proches de 85 Pa mais, à l'inverse du soufflage, la région soumise à ces fortes variations de pression est limitée au voisinage de la fente d'aspiration.

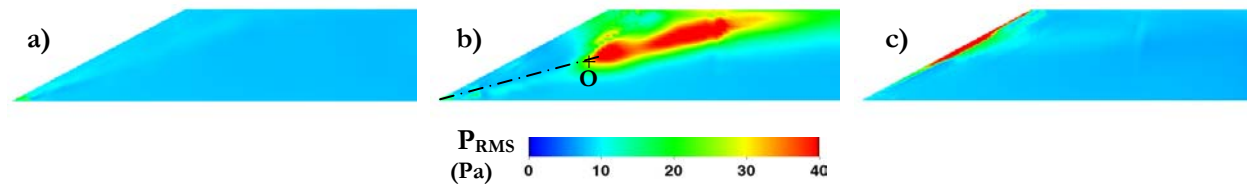


Fig. 4. Répartition pariétale de la pression quadratique moyenne P_{RMS} sur la face latérale de la géométrie. a) sans contrôle, b) avec soufflage, c) avec aspiration.

4.3 Analyse des densités spectrales d'énergie

Les évolutions des densités spectrales d'énergie des signaux de pression statique fournis par les quatre sondes pariétales sont reportées figures 5a, b, c et d.

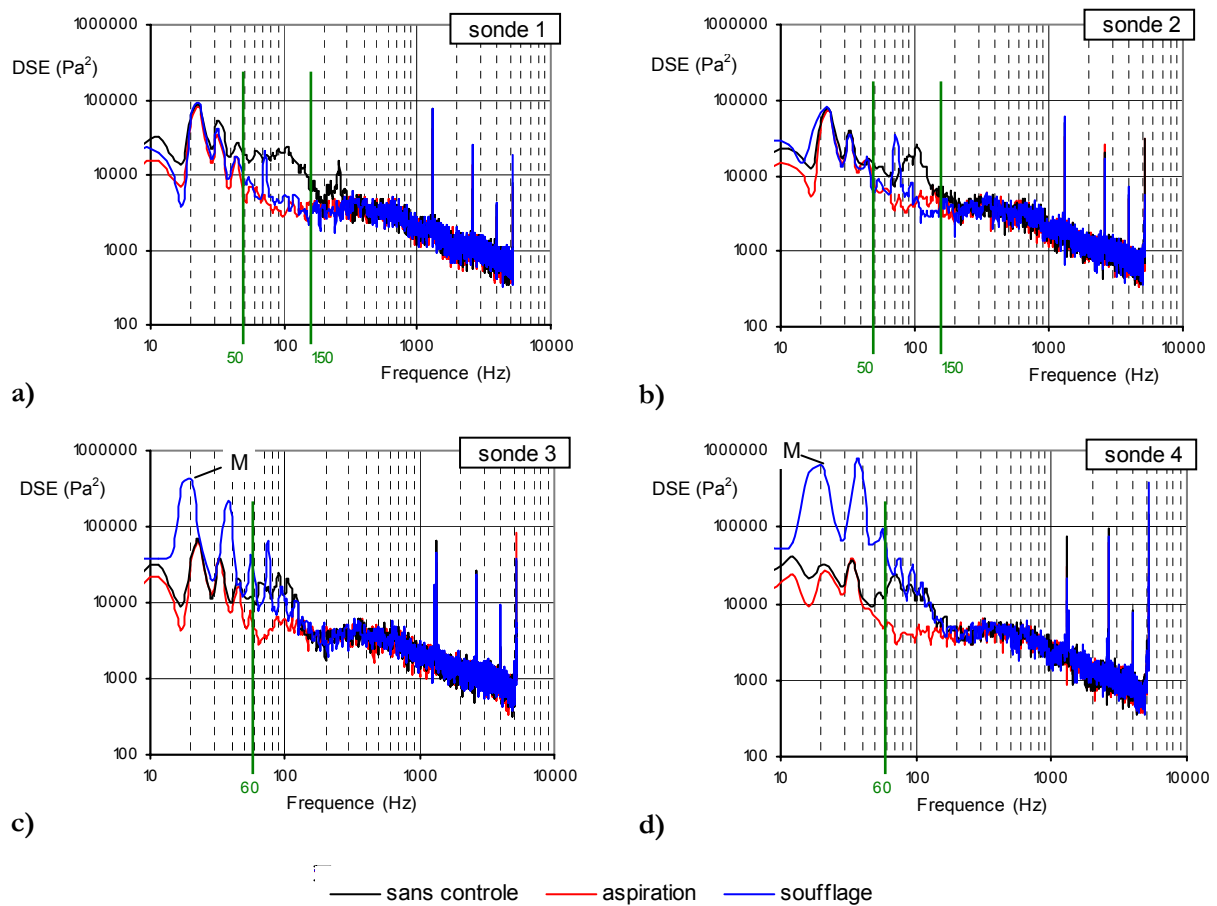


Fig. 5. Densité spectrale d'énergie DSE du signal de pression tracé sur une échelle logarithmique. a) sonde (1), b) sonde (2), c) sonde (3), d) sonde (4).

L'analyse des résultats obtenus pour les sondes (1) et (2) (figure 2) montre que les solutions de contrôle par soufflage et aspiration ont tendance à diminuer les niveaux des fluctuations de pression pour des fréquences comprises entre 50 Hz et 150 Hz (figures 5a et b). Dans cette bande fréquentielle, les valeurs moyennes des DSE sont respectivement proches de 20000 Pa² et 7000 Pa² pour les cas sans contrôle et avec soufflage/aspiration. Les évolutions des DSE du signal relevés par les sondes (3) et (4) pour le cas d'aspiration et sans contrôle restent semblables à celles relevés par les sondes (1) et (2). A l'inverse, pour la

configuration de soufflage, l'intensité des fluctuations de pression augmente de manière significative pour des fréquences inférieures à 60 Hz. L'apparition d'un pic associé à la valeur max de la DES, repéré par le point M figures 5c et d, pour une fréquence proche de 20 Hz est associée au passage des dépressions et surpressions successives au voisinage de l'axe tourbillonnaire (vitesse d'advection voisine de 19Hz, section 4.1). Ce dernier résultat montre que l'éclatement des structures tourbillonnaires longitudinales de montant de baie dégrade la prestation acoustique des véhicules. A l'inverse, la suppression des structures tourbillonnaires par recollement au niveau de la paroi latérale de la géométrie est associée à une diminution de l'intensité des fluctuations de pression sous l'axe tourbillonnaire. Cette suppression constitue ainsi une voie de progrès particulièrement intéressante pour réduire la traînée aérodynamique [2] et le bruit d'origine aéro-acoustique.

5 Conclusions

L'analyse de l'influence des techniques de contrôle par soufflage et aspiration sur les champs instantanés de pression statique relevés au voisinage d'un montant de baie est réalisée par simulation numérique tridimensionnelle instationnaire autour d'une géométrie simplifiée de véhicule automobile. Les résultats présentés dans ce papier complètent et enrichissent les résultats numériques obtenus sur le contrôle des tourbillons longitudinaux de montant de baie par Lehugeur et al [2]. L'analyse des résultats permet ainsi de quantifier les amplitudes et les fréquences caractéristiques des fluctuations de pression pariétale au voisinage d'une structure tourbillonnaire de montant de baie, sans et avec contrôle par soufflage/aspiration au niveau de l'arête latérale du pare-brise.

Le contrôle par soufflage provoque l'éclatement tourbillonnaire qui s'accompagne d'une augmentation brusque des fluctuations de pressions à basses fréquences (<60 Hz), de l'ordre de 70 Pa, au voisinage de l'axe tourbillonnaire. Le contrôle par aspiration permet de supprimer la structure tourbillonnaire longitudinale par recollement et de réduire l'intensité des variations de pression au niveau de la paroi latérale de la géométrie. L'aspiration induit cependant des pressions quadratiques moyennes importantes de l'ordre de 85 Pa au voisinage de la fente d'aspiration.

Les résultats présentés dans cet article mettent en évidence que le phénomène d'éclatement tourbillonnaire est à l'origine de fluctuations importantes du champ de pression statique au voisinage des montants de baie. Ce travail permet également d'identifier des préconisations pour améliorer les performances aérodynamiques sans dégrader la prestation aéro-acoustiques de véhicules. Dans cette perspective, la technique de contrôle des tourbillons longitudinaux par aspiration au niveau des montants de baie semble particulièrement adaptée aux besoins et aux contraintes du milieu automobile pour réduire la traînée et le bruit d'origine aérodynamique.

Références

- [1] GILLIERON P., 2002, "Contrôle des écoulements appliqué à l'automobile, état de l'art", *Mécanique et Industrie*, Elsevier, décembre 2002.
- [2] LEHUGEUR B. & GILLIERON, P., 2006, "Drag reduction by active control of A-pillar vortex breakdown on a simplified car geometry", *Proceedings of the Ercraft European Drag Reduction and Flow Control Meeting*, 10-14 April, Ischia, Italy.
- [3] HUCHO, W. H. (ed.), 1998, "Aerodynamics of road vehicles", 4th edition, SAE ed., ISBN 0768000297.
- [4] ARGUILLAT B., RICOT D., ROBERT G., BAILLY C., 2005, "Measurements of the wavenumber-frequency spectrum of wall pressure fluctuations under turbulent flows", AIAA Paper 2005-2855.
- [5] CHEN, S, CHEN, H., and MATTHEUS W., 1991, "Recovery of the Navier-Stokes equations using a lattice-gas Boltzmann method", *Phys. Rev. Lett.*, 67 (1991), pp. 511-525.
- [6] YAKHOT, V., ORSZAG, S., THANGRAM, S., GATSKI, T., SPEZIALE, C., 1992, *Physics of Fluids*, Vol. 4 (1992), p.1510.
- [7] MAX, J. & LACOUME, J. L., 1996, "Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques", *Ed Masson*, 5^{ème} édition.