

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 201

Analyse expérimentale et numérique du champ de pression pariétale sur les vitrages de véhicules automobiles

Sandrine Vergne, François Van Herpe

PSA Peugeot-Citroën, 2 route de Gisy, 78943 Vélizy-Villacoublay Cedex, sandrine.vergne@mps.com

Le bruit d'origine aérodynamique est depuis perçu dès 80 km/h et il est prépondérant à partir d'environ 100 km/h (la vitesse seuil dépendant du revêtement, pneus, régime moteur...) et pour les fréquences supérieures à 400 Hz. Le bruit aérodynamique entendu dans l'habitacle provient de l'écoulement autour du véhicule et plus particulièrement au voisinage des vitrages (sillage du rétroviseur, tourbillon de montant de baie, ...). Le champ de pression instationnaire induit par l'écoulement charge les vitrages qui vibrent et rayonnent dans l'habitacle. Le niveau de bruit intérieur est fonction de l'intensité du champ de pression pariétale mais également de ses corrélations spatio-temporelles.

Dans cet article, des essais en soufflerie aéroacoustique et des simulations aérodynamiques instationnaires ont permis de caractériser le champ de pression pariétale sur les vitrages latéraux de plusieurs véhicules. Les véhicules sont placés dans une soufflerie anéchoïque à une vitesse de 140 km/h, correspondant à une vitesse sur autoroute, en vent de face et latéral (angle à 10° de dérapage).

Les mesures de pression pariétale sont obtenues à partir d'un réseau de microphones montés affleurant sur les vitrages. Les résultats numériques sont obtenus par une simulation instationnaire basée sur la méthode de Lattice Boltzmann (LBM). Les densités spectrales de puissance mesurées et simulées sont analysées et comparées pour valider le calcul. Les caractéristiques spatio-temporelles sont étudiées en terme de cohérence entre deux points et de vitesse de convection en différentes localisations sur le vitrage et sont comparées à des modèles analytiques de la littérature.

1 Introduction

Dans l'objectif d'améliorer le confort des passagers, deux des principales sources de bruit perçues à l'intérieur de l'habitacle des véhicules – le bruit GMP et le bruit de roulement (contact pneumatique/chaussée) – ont été notablement réduites ces dernières années. En conséquence, pour les véhicules récents, avec des chaînes de traction thermique, les sources de bruit aérodynamiques deviennent prépondérantes dans les trajets de type autoroutier ou péri-urbain, pour des vitesses de circulation supérieures à 100 km/h où elles émergent dans les bandes de fréquence au-dessus de 400 Hz. La synthèse de ces principales sources est actuellement en mutation avec l'arrivée des nouvelles chaînes de traction hybrides et électriques.

Actuellement, les spécifications pour le bruit aérodynamique portent sur le bruit perçu par les occupants du véhicule et les études aéroacoustiques sont essentiellement pratiquées par voie expérimentale sur véhicule prototype ou maquette soufflerie. La mise au point d'un véhicule, d'un point de vue aéroacoustique, s'effectue suivant deux critères : le contrôle du bruit de forme, lié aux décollements générés par le contournement de l'écoulement autour du véhicule, et la mise au point des joints et étanchéités. Cet article concerne la caractérisation du champ de pression pariétale à l'origine du bruit de forme.

2 Problématique : aéroacoustique automobile

Le chargement aérodynamique des virages automobiles est typiquement séparé en deux composantes « incompressible » (encore dénommée « convective » ou «

élastique » ou « turbulente ») et « compressible » (ou « acoustique ») :

$$p_{\text{totale}}(t) = p_0 + p'_{\text{conv}}(t) + p'_{\text{ac}}(t) \quad (1.)$$

Ces deux composantes diffèrent par :

- Leurs vitesses de propagation :

Les fluctuations incompressibles correspondent à l'impact sur la paroi des structures tourbillonnaires convectées par l'écoulement à la vitesse $U_c \leq U_{\text{écoulement}}$.

Les fluctuations compressibles correspondent à des ondes acoustiques qui se propagent à la vitesse du son c_0 .

- Leurs corrélations spatiales

La projection sur la paroi des fluctuations acoustiques compressibles correspond à des longueurs d'onde beaucoup plus grande que la projection des fluctuations compressibles, puisque $U_c \ll c_0$.

- Leurs niveaux :

Il est admis par tous que le spectre de pression pariétale élastique engendré par les fluctuations de pression incompressible a un niveau beaucoup plus élevé (25 à 30dB [3]) que le spectre acoustique engendré par les fluctuations de pression compressible.

- Leurs mécanismes de transferts vibro-acoustiques vers l'intérieur de l'habitacle :

La faiblesse du chargement compressible acoustique peut être compensée par un transfert vers l'habitacle beaucoup plus efficace que celui du chargement incompressible, notamment à partir de la fréquence de coïncidence acoustique du vitrage.

Pour les séparer, on a souvent recours à une double transformée de Fourier de la corrélation spatiotemporelle dans les nombres d'onde et en fréquence pour arriver à une représentation dans l'espace $k-\omega$:

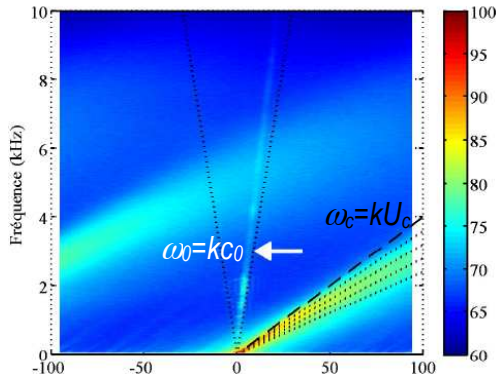


Figure 1: Spectre de pression pariétale dans l'espace $k-\omega$, d'après [4]

Nous nous concentrerons dans ce travail sur le chargement aérodynamique incompressible convecté par l'écoulement.

La plupart des approches numériques pour estimer le bruit d'origine aéroélastique à l'intérieur de l'habitacle automobile, repose sur une modélisation des propriétés spatiotemporelles du chargement pariétal. Le plus célèbre des modèles est celui de Corcos (1963), sans doute en raison de sa facilité de mise en œuvre, puisqu'il décrit la corrélation spatiale des fluctuations de pression pariétale par des exponentielles décroissantes.

$$\gamma_{ref}(x, x', f_k) = e^{-\alpha_1 \omega \xi_1 / U_c} e^{-\alpha_2 \omega \xi_2 / U_c} e^{i \omega \xi_1 / U_c}$$

où U_c est la vitesse de convection, (α_1, α_2) est un jeu de paramètres caractérisant la décroissance longitudinale et transversale de l'écoulement. Ce jeu de paramètre permet de définir le facteur d'orthotropie $K = \alpha_1 / \alpha_2$.

Le modèle de Corcos est pourtant mis à défaut aux faibles nombre d'onde où il surestime le spectre de pression pariétale [1]. Or, on s'intéresse dans l'automobile au bruit aérodynamique à partir de 400Hz, c'est-à-dire précisément dans le domaine des faibles nombres d'onde, où la vitesse de convection U_c des structures tourbillonnaires impactant le vitrage est inférieure à la vitesse de propagation c_f des ondes de flexion dans le vitrage.

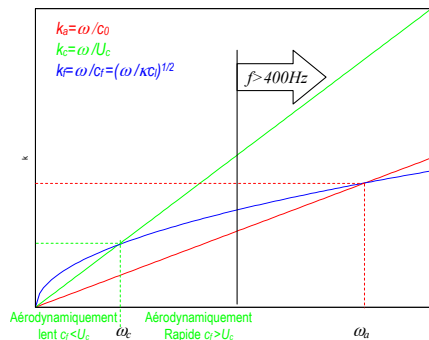


Figure 2: Courbes de dispersion du vitrage

D'autre part, ce modèle décrit de manière uniforme l'empreinte de l'écoulement sur la paroi. La corrélation spatiale, la vitesse de convection et le contenu fréquentiel du spectre de pression pariétale ne dépendent pas de l'endroit où on se trouve sur la vitre. Nous montrons dans cet article que ces hypothèses ne sont pas vérifiées dans le cas d'un écoulement d'air autour d'une automobile.

De nombreux autres modèles ont été proposés pour améliorer celui de Corcos (voir [2] par exemple), mais ils reposent tous sur la caractérisation expérimentale de constantes, qui dépendent notamment de la nature de l'écoulement et de l'état de surface de la paroi. Ils ne sont donc pas prédictifs. Le choix d'un modèle adapté aux vitrages automobiles et l'évaluation des constantes associées restent difficile sans une analyse fine du chargement pariétale.

Les constantes utilisées dans les modèles de corrélation sont généralement mesurées dans des configurations expérimentales où la direction de l'écoulement moyen et la direction transversale à cet écoulement sont bien définies et ne varient pas sur la paroi.

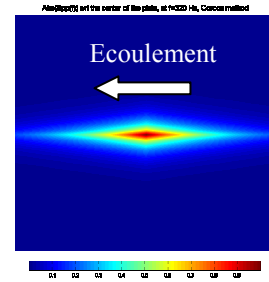


Figure 3 : Cohérence à 320 Hz au centre d'une plaque rectangulaire de $0.5 \times 0.45 \text{ m}^2$ avec un modèle de Corcos

Ce n'est évidemment pas le cas dans pour des vitrages latéraux avant d'une automobile, où l'écoulement est fortement tridimensionnel.

Pour toutes ces raisons, il conviendrait si on veut utiliser une modélisation empirique pour le spectre de pression pariétale de découper le vitrage en plusieurs zones avec des contenus fréquentiels, des vitesses de convection, des corrélations spatiales différentes.

L'évaluation numérique par un calcul non stationnaire des fluctuations de pression pariétale en tout point du vitrage permet de s'affranchir de ces difficultés de modélisation en accédant directement aux corrélations spatiale et temporelle.

L'objectif de cet article est de valider le chargement aérodynamique issu des calculs non stationnaires basés sur la méthode de Lattice-Boltzmann (LBM) en le comparant, en termes de densité spectrale de puissance (DSP) des pressions pariétales incompressibles, avec des essais en soufflerie aéroacoustique. Une analyse plus fine est effectuée sur les résultats numériques afin de caractériser leurs corrélations spatiales, propriété déterminante pour le transfert vibro-acoustique.

3 Set-up expérimentaux et numériques

3.1 Configurations

L'étude est réalisée sur un cas de véhicule réel pour lequel six variantes de la géométrie sont étudiées expérimentalement et numériquement :

- C03 constitue le cas de référence,
- C19 représente une modification de la profondeur de la baie d'auvent
- C25 est une modification de la jonction entre la baie d'auvent et le montant de baie (déplacement vers l'arrière du montant)

- C31 est une évolution inverse de cette jonction (déplacement vers l'avant du montant).
- C35 est caractérisé par un pare-brise verticalisé.
- C37 est une combinaison des cas C25 et C35 (pare-brise verticalisé et déplacement vers l'arrière du montant de baie).

Les maquettes de ces six configurations sont réalisées à partir des CAO pour assurer la conformité géométrique de la zone analysée.

3.2 Montage expérimental

Le champ de pression pariétale fluctuante est caractérisé sur les différentes maquettes de véhicule en soufflerie anéchoïque (S2A Souffleries Aéroacoustiques Automobiles à Saint Cyr l'école, France) à une vitesse d'écoulement $U_0=38,9$ m/s, i.e. $U_0 \sim 140$ km/h. Les mesures sont réalisées en vent de face (le véhicule et l'écoulement sont alignés ; l'angle de dérapage est nul) et en vent latéral, sur la vitre sous le vent, qui correspond à la configuration la plus bruyante.

Différents méthodes d'instrumentation des panneaux peuvent être utilisées :

- les montages en surface, en positionnant des capteurs de faible épaisseur sur la paroi.
- les montages affleurant de microphones (ou *flush mounting*) pour lesquels la surface sensible du microphone est positionnée à niveau avec la paroi,
- les capteurs positionnés derrière un orifice (*pinhole mounting*) où le microphone est positionné dans une petite cavité mise en relation avec la paroi par un tube très fin. Ce montage nécessite un étalonnage préalable pour qualifier la réponse du système.

Les capteurs de type Brüel & Kjær type 4138 sont implantés sur les maquettes avec montage *flush mounting* (Cf. Figure 4). Ils présentent une surface sensible du capteur plus importante qu'un montage déporté ; cette surface réalise un filtrage spatial du signal. Les fluctuations de pression de longueur d'onde inférieure aux dimensions de cette surface sensible auront alors une contribution globale nulle sur celle-ci. Ce type de montage ne nécessite pas de caractérisation préalable (mesure des FRF) ; ceci permet donc des mises en œuvre plus facile et plus rapide pour des applications en contexte industriel.

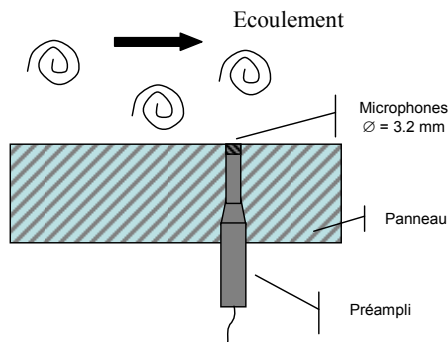


Figure 4 : Montage expérimental des capteurs.

L'implantation des microphones a pris en compte la topologie de l'écoulement : la densité est importante dans la zone de signature du tourbillon de montant de baie sur la vitre latérale et la répartition est relâchée dans les zones calmes (Cf. Figure 5).

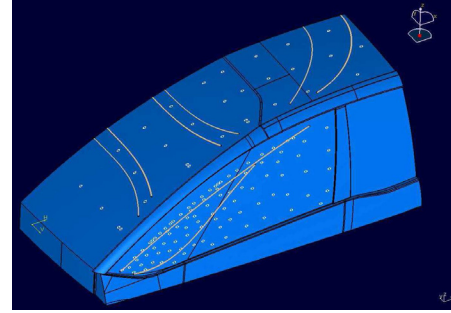


Figure 5 : Position des capteurs sur une des maquettes.

3.3 Approche numérique

Les simulations sont réalisées avec le logiciel Powerflow, basé sur la méthode Lattice Boltzmann (LBM) sur les véhicules échelle 1. Le détail du schéma numérique, dont les équations fondamentales LBM, les conditions aux limites et les modèles de turbulence sont identiques à ceux explicités par Chen et al. [5, 6] et Senthoooran et al. [7] ; ils ne sont pas présentés ici.

En terme de maillage, la résolution spatiale est $\Delta x=1$ mm dans la zone d'intérêt (montant de baie, vitre latérale, le pare-brise ...), où sont positionnés les capteurs.

Le temps physique exploité pour les analyses spectrales est $t=0.5$ s (pour 0.7 s simulées). La fréquence d'échantillonnage sur les sondes est $f_s=53$ kHz. Afin d'enregistrer l'information sur l'ensemble des éléments surfaciques (surfels), la fréquence d'échantillonnage sur la vitre est limitée à 6.7 kHz.

4 Validation de la simulation : comparaison essai/calcul des DSP de pression pariétale

4.1 Sondes de pression pariétale

La première analyse consiste à étudier la qualité des résultats en comparant points par points les spectres mesurés et simulés (Cf. Figure 6). Cette corrélation montre une bonne concordance du calcul avec les essais sur une gamme de fréquence [100 – 2.5 kHz] dans les zones turbulentes et [100 Hz – 1 kHz] dans les zones plus calmes.

4.2 Chargement de pression pariétal

L'objectif final de l'étude sera de réaliser la synthèse acoustique du bruit perçu dans l'habitacle. Une donnée d'entrée de la filière de modélisation aéroacoustique du bruit intérieur est le spectre moyen de pression pariétale sur la vitre. Nous avons donc analysé les spectres moyens sur les sondes (moyenne arithmétique) en bandes fines sur la vitre en vent de face et en vent latéral (sous le vent à 10° de dérapage) :

$$\overline{\Phi_{DSP}(f_k)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Phi_{DSP}(x_i, x_i, f_k) \quad (2.)$$

Les comparaisons essais/calculs montrent une comparaison essai/calcul satisfaisante (écart inférieur à 3 dB sauf pour le cas C25 à 0°, et dans une moindre mesure pour C37) avec, cependant, pour tous les cas, une surestimation du calcul.

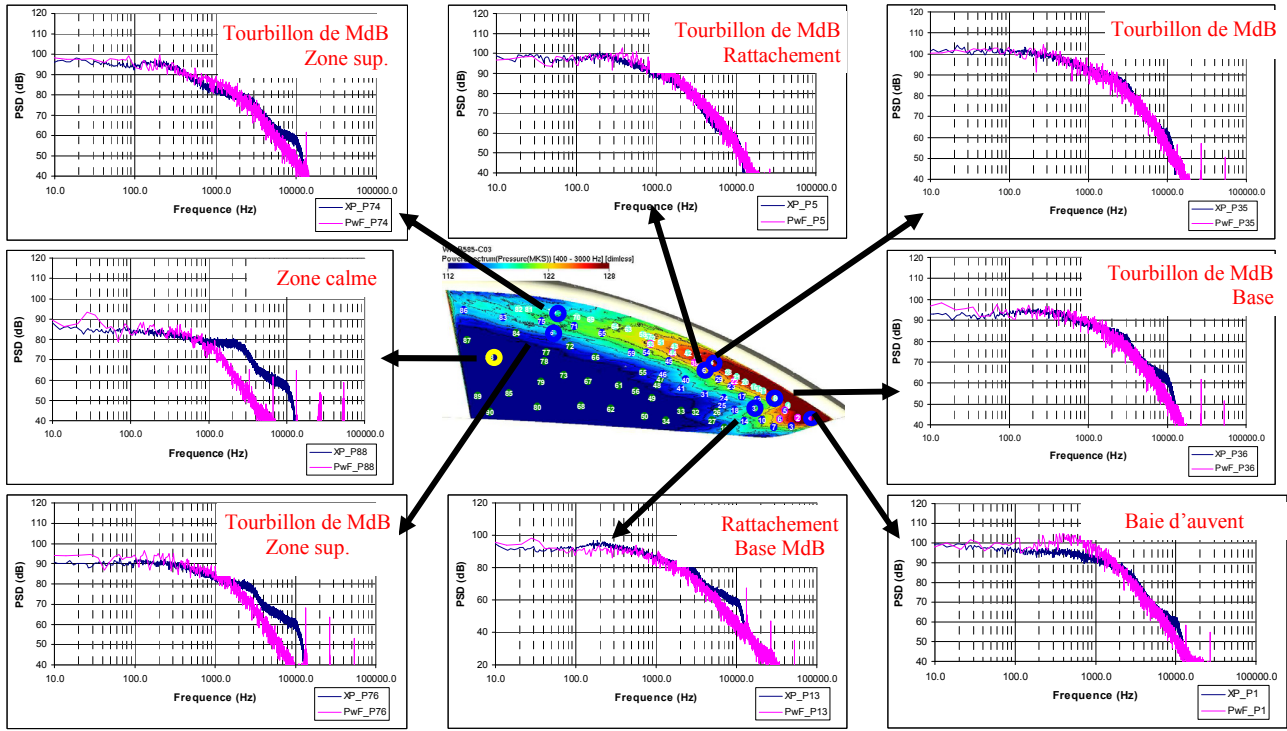


Figure 6 : Comparaison essai/calcul des spectres sur les sondes expérimentales et numériques.
Configuration C03 en vent de face

expérimentales, des sondes numériques et de la moyenne surfacique de la pression sur l'ensemble du panneau :

$$\overline{\Phi}_{AW}(f_k) = \frac{1}{S_{vitre}} \sum_{i=1}^N \Phi_{PSD}(x_i, x_i, f_k) \Delta S_i \quad (3.)$$

Où N n'est pas le nombre de sondes mais le nombre d'éléments surfaciques utilisés par le code CFD pour modéliser la surface de la vitre.

Les niveaux de pression rms intégrés sur la gamme de fréquence [200 Hz – 2.5 kHz] confirment les observations faites sur les spectres moyens. Les écarts essais/calculs sont inférieurs ou égal à 3 dB hormis la configuration C25 (écart de l'ordre de 4 dB). Notons que les configurations C25 et C37 (configurations pour lesquels les écarts essais/calculs sont les plus importants) ont en commun un déplacement du montant de baie de 50 mm vers l'avant.

La comparaison essai/calcul est très sensible à la localisation des sondes : un léger décalage d'instrumentation ou de calcul peut positionner ces sondes au cœur ou à l'extérieur du tourbillon de montant de baie, pouvant induire des écarts significatifs.

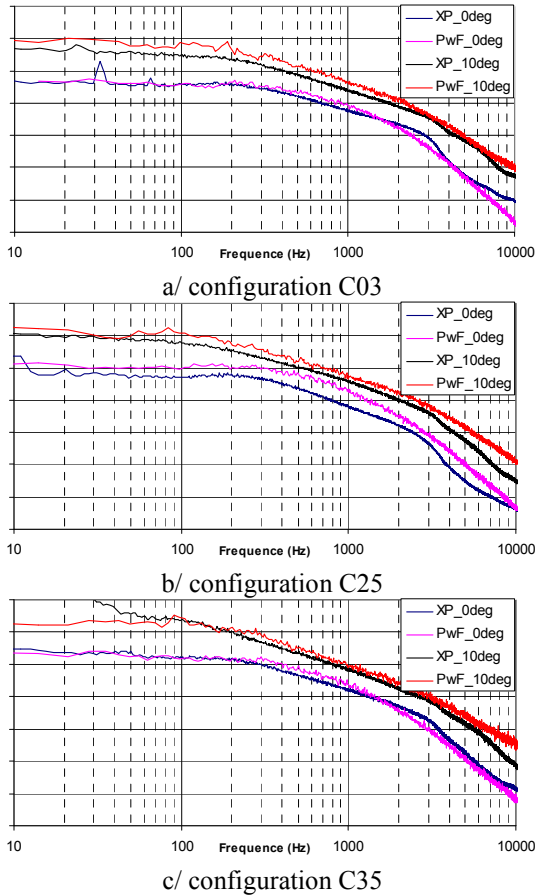
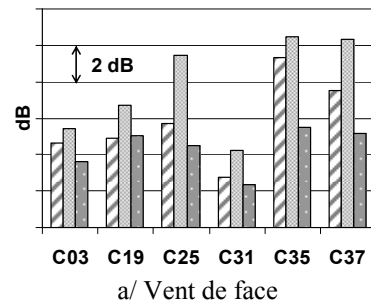


Figure 7 : Spectres moyens de pression pariétale sur la vitre latérale en vent de face (0°) et latéral (10°)

Les DSP de pression pariétale sont exploitées pour calculer le niveau de pression moyen sur la vitre pour la gamme de fréquence [200-2500Hz]. Les niveaux 'Exp', 'Num-Probes' and 'Num-AW' correspondent respectivement aux niveaux obtenus par moyenne arithmétique des sondes



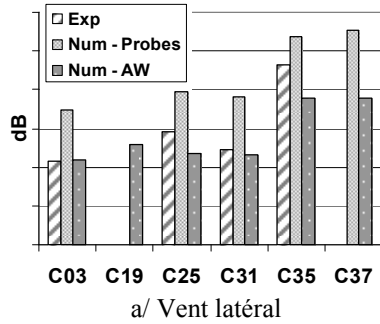


Figure 8 : Comparaison essai/calcul du niveau de pression (dB) moyen sur la vitre pour la gamme de fréquence [200 Hz – 2.5 kHz].

La comparaison numérique ('Num-Probes' vs 'Num-AW') montre la nécessité d'instrumenter correctement la vitre : les écarts sont importants entre les deux niveaux de pression pariétale moyens. Notons qu'il est difficile, d'un point de vue expérimental, d'avoir un maillage dense de capteurs et de positionner des microphones près des bords de la vitre.

La hiérarchisation des différentes formes de véhicules montre que le classement est bien prédit sur la gamme de fréquence étudiée. L'analyse du champ de pression pariétal en terme de Densité Spectrale de Puissance a permis de valider la simulation aérodynamique instationnaire Powerflow.

5 Analyse physique multipoints

Etant donnée la nature instationnaire du code PowerFlow, il a été possible de réaliser des investigations sur certains paramètres liés à la caractérisation spatio-temporelle du champ de pression pariétale, à savoir, la vitesse de convection et le facteur d'orthotropie K (rapport entre les corrélations spatiales longitudinales et latérales), grandeurs classiquement utilisées pour la prédiction du bruit intérieur.

Les analyses multi-points sont réalisées en différentes zones sur la vitre (Cf. Figure 9) : 2 points dans le tourbillon de montant de baie (1 et 2), un point dans le tourbillon issu de la baie d'auvent (3) et un point dans la zone calme (4).

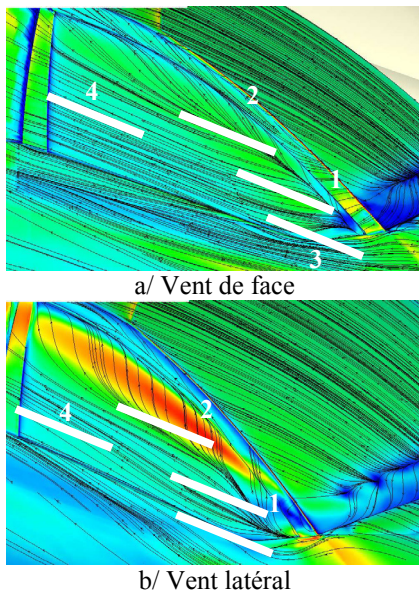


Figure 9: Localisation des zones d'analyse sur la cartographie de vitesse proche paroi.

5.1 Vitesse de convection

La vitesse de convection U_c représente la vitesse à laquelle les structures turbulentes, et donc leur signature à la paroi, sont transportées. La vitesse U_c peut-être extraite des représentations en (k, f) obtenues par TNO (Transformée en Nombre d'Ondes). Pour chaque point de référence, la transformée de Fourier en temps et en espace de la matrice inter-spectrale avec l'ensemble des points voisins est tracée. La pente obtenue est proportionnelle à la vitesse de convection U_c (Cf. Figure 10).

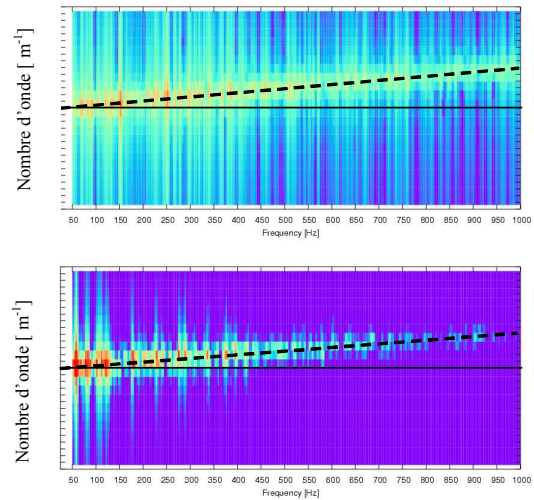


Figure 10 : Représentation (k, f) - Cas C03 – a/ zone calme (haut), b/ zone du tourbillon de montant de baie (bas).

Les résultats montrent que la vitesse de convection est fonction de sa localisation sur la vitre et l'angle de dérapage.

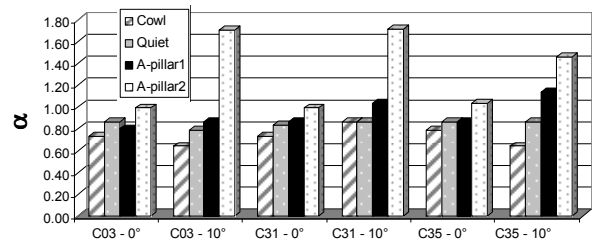


Figure 11 : Evolution de la vitesse de convection sur la vitre : $\alpha = U_c / U_\infty$.

La vitesse de convection est importante dans les zones où les fluctuations de pression sont importantes. Ainsi, dans quasiment toutes les configurations, la vitesse de convection est minimale dans la zone calme (avec une valeur de l'ordre de 0.6 à 0.8 fois la vitesse de l'écoulement) et maximale dans la zone du tourbillon de montant de baie (de l'ordre ou supérieure à la vitesse de référence).

La nature tridimensionnelle de l'écoulement au voisinage de la vitre rend difficile le calcul de la vitesse de convection. Les lignes d'analyse doivent être alignées avec l'écoulement, pour chaque configuration et chaque point. Une autre approche, utilisant un repère local et la phase des inter-spectres, permet d'obtenir des valeurs comprises entre 0.9 et 1 dans la zone du tourbillon de montante de baie [8].

5.2 Cohérence

La cohérence est extraite en différentes zones de la vitre. Les tâches de cohérence sont alignées avec la direction locale de l'écoulement. Leur forme elliptique diffère de celle de Corcos (Cf. Figure 3).

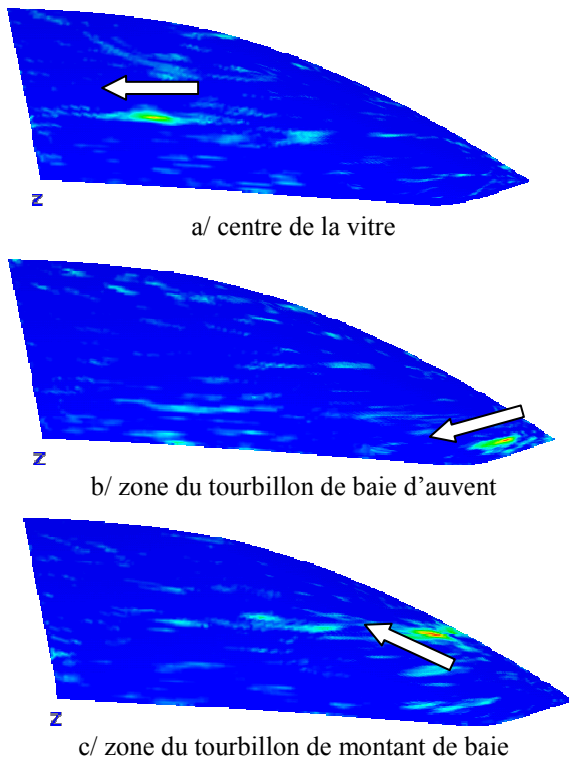


Figure 12 : Cohérence en différents points de la vitre.

Le facteur d'orthotropie K est extrait à partir de l'étirement de la surface de cohérence. Il varie sur la vitre et avec la fréquence.

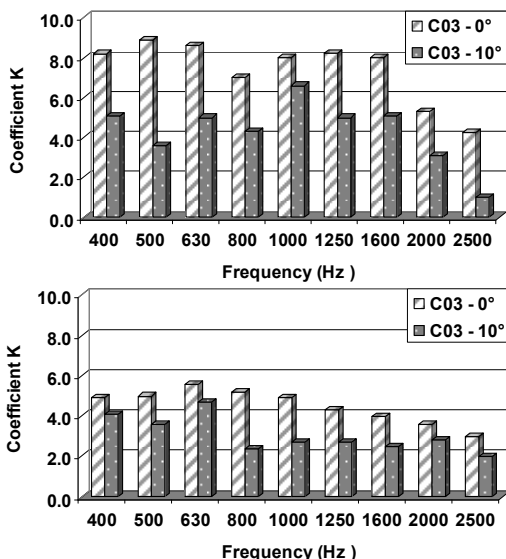


Figure 13 : Evolution du coefficient d'orthotropie K
Zone calme (haut), Zone du montant de baie (bas)

Le facteur d'orthotropie est de l'ordre de 7 (grandeur classique dans la littérature pour une couche limite turbulente) dans les zones calmes et semble diminuer lorsque les fluctuations de pression augmentent (de l'ordre de 4 dans la zone du tourbillon de montant de baie lorsque le véhicule est en vent de face et de 2 en vent latéral).

6 Conclusion

Dans cette étude, nous avons caractérisé le champ de pression pariétale pour différentes formes de véhicule, à différents angles de dérapage. La comparaison des essais avec une simulation numérique instationnaire a montré une bonne corrélation des DSP de pression sur la vitre latérale, à la fois en terme de niveau et de contenu fréquentiel.

Les grandeurs caractéristiques (U_c , K) estimées sont en accord avec les valeurs de la littérature. L'analyse des corrélations spatiales montre cependant une forte dépendance à la localisation sur la vitre, à la fréquence, à l'angle de dérapage et à la géométrie. Cette dispersion montre la difficulté d'obtenir un modèle universel pour décrire le chargement de pression pariétale sur une vitre latérale d'un véhicule automobile. Les simulations aérodynamiques instationnaires permettent soit d'extraire localement les paramètres adéquats, soit de calculer directement l'énergie injectée dans la structure à partir des résultats spatio-temporels.

Remerciements

Les auteurs remercient O. Tailhades, du service conception aérodynamique de PSA, qui a réalisé les essais et M. Meskine, de la société EXA, pour son aide dans la mise en œuvre des simulations et de leur analyse.

Références

- [1] Y.F. Hwang, G. Maidanik, "A Wavenumber Analysis of the Coupling of a Structural Mode and Flow Turbulence", Journal of Sound and Vibration (1990), 142(1),135-152
- [2] W.R. Graham, "A Comparison of Models for The Wavenumber-Frequency Spectrum of Turbulent Boundary Layer Pressures", Journal of Sound and Vibration (1997),206(4), 541-565
- [3] P.G. Bremner, Ming Zhu, « Recent Progress using SEA and CFD to Predict Interior Wind Noise », SAE 2003-01-1705
- [4] S. Debert et al. Inter. Congress on Acoustics Madrid, 2007
- [5] Chen, H., Teixeira, C. and Molvig, K. "Digital Physics Approach to Computational Fluid Dynamics, Some Basic Theoretical Features," Intl. J. Mod. Phys. C, 8 (4), 1997, p. 675." Intl. J. Mod. Phys. C, 1997: vol. 8 (4), p. 675.
- [6] Chen, S. and Doolen, G. "Lattice Boltzmann Method for Fluid Flows", Ann. Rev. Fluid Mech., vol.30: p.329-364, 1998.
- [7] Senthoooran, S. et al, "Prediction of wall pressure fluctuations on an automobile side-glass using a lattice-Boltzmann method", AIAA Paper 2006-2559, Cambridge, Massachusetts, 2006.
- [8.] Pérot F., Meskine M., Vergne S., "Investigation of the statistical properties of pressure loadings on real automotive side glasses", 15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (30th AIAA Aeroacoustics Conference), 11 – 13 May, 2009, Miami, Floride.