

**CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018**  
**14<sup>ème</sup> Congrès Français d'Acoustique**



**Transmission des fluctuations de bruit dans un modèle d'habitable automobile générées par un écoulement instationnaire : étude en soufflerie**

C. Zumu Doli<sup>a</sup>, H. Lazure<sup>b</sup>, V. Valeau<sup>a</sup>, L.-E. Brizzi<sup>a</sup>, J.-C. Valière<sup>a</sup> et F. Van Herpe<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Institut PPRIME UPR 3346, CNRS-Université de Poitiers-ENSMA, B17, 6 rue Marcel Doré, 86022 Poitiers Cedex, France

<sup>b</sup>PSA groupe, Case Courrier VV1405 - CTV A, Route de Gisy - Innoval Parc Sud, 78943 Velizy Villacoublay Cedex, France

christian.zumu.doli@univ-poitiers.fr

Lors de son déplacement, un véhicule automobile interagit avec un écoulement turbulent instationnaire qui module en amplitude le bruit à l'intérieur de l'habitacle. Ainsi les variations temporelles de l'écoulement incident dégradent la qualité de l'ambiance acoustique. Cette étude vise à décrire et comprendre les mécanismes aérovibro-acoustiques afin de pouvoir en tirer des règles de conception pour les futurs véhicules. Un banc d'essai est conçu en soufflerie anéchoïque BETI afin d'étudier la génération puis la transmission de ces fluctuations de bruit. L'écoulement de marche montante est choisi comme source de bruit aéroacoustique rayonnant dans un caisson anéchoïque, lequel sert de modèle d'habitacle automobile. Une vitre est utilisée afin de modéliser la transmission de ces fluctuations de bruit dans ce volume d'écoute placé juste en-dessous de la marche. Un dispositif actif (volet) fixé au niveau du convergent de la veine d'essai est utilisé afin de générer une variation temporelle contrôlée de la vitesse de l'écoulement incident. L'approche retenue consiste, pendant le temps de maniement du volet, à mesurer et relier le champ de vitesse externe à la pression pariétale d'une part, puis au champ acoustique interne obtenu par transmission d'autre part. La technique de vélocimétrie laser par images de particules à haute cadence d'échantillonnage (TR-PIV à 20 kHz) est utilisée pour effectuer la mesure du champ de vitesse. L'analyse des données est basée sur le calcul d'indicateurs de la fluctuation énergétique des différentes quantités. Des outils de corrélation spatio-temporelle sont alors développés pour mettre en évidence les zones de l'écoulement les plus corrélées avec les fluctuations de pression pariétale et le bruit intérieur. Des pistes de compréhension de la génération des phénomènes de fluctuation de bruit sont alors formulées.

## 1 Introduction

Les paramètres d'esthétique et de sécurité ont plus d'impacts sur le choix de la forme globale d'un véhicule automobile que la performance aérodynamique. La capacité d'un véhicule de série à pénétrer dans l'air n'est donc en général pas optimale. Il s'en suit donc que l'écoulement autour d'un véhicule est dominé par la présence de structures aérodynamiques fortement décollées, tourbillonnaires et tridimensionnelles (en particulier dans la région du montant de baie [2]). Ces zones de l'écoulement sont le siège de la génération du bruit aérodynamique et sont très sensibles aux rafales de vent (liées à la couche limite atmosphérique) ou aux instationnarités dues aux sillages des autres véhicules, ce qui mène à une modulation en amplitude du bruit dans l'habitacle [1], celui-ci étant par ailleurs large bande et émergeant nettement dans les hautes fréquences. George [3] a mis en évidence l'importance du tourbillon de montant de baie en particulier, dans la génération du bruit aérodynamique pour des vitesses supérieures à 100 km/h.

Cette modulation d'amplitude du bruit dans l'habitacle se traduit par une impression de "bouffée" à l'oreille du conducteur et est perçue comme particulièrement désagréable. La modulation d'amplitude est généralement attribuée aux variations de vitesse et la variation de la fréquence de modulation aux variations de direction de l'écoulement. L'oreille humaine est par ailleurs particulièrement sensible aux fréquences de modulation autour de 4 Hz [4]. La caractérisation de cet effet de modulation nécessite l'application d'outils de traitement des signaux permettant d'évaluer à court terme le niveau de fluctuation du bruit intérieur.

On s'attache à mettre en évidence dans le cadre de cette étude effectuée en soufflerie, les mécanismes de génération et de transmission de ces fluctuations de bruit. Un montage expérimental générique est conçu afin d'effectuer cette étude. Pour cela l'écoulement de marche montante est utilisé à titre de modèle d'écoulement décollé. Celui-ci est considéré comme proche de la configuration réelle (l'écoulement autour du montant de baie) et bidimensionnel en moyenne. Une étude similaire visant à étudier les mécanismes de transmission de bruit à travers une vitre a été effectuée par Bessis [5] en considérant des mesures simultanées de vitesse et de pression pariétale mais aussi de vitesse et

de pression acoustique. Cette étude a permis de mettre en évidence la contribution des structures aérodynamiques cohérentes à l'excitation de la vitre et à la transmission du bruit. L'originalité de la présente étude réside dans l'implémentation d'un dispositif actif servant à moduler la vitesse incidente dans la veine d'essai afin d'étudier la transmission des fluctuations de bruit induites par le mouvement de ce dispositif. Pour cela, on a recours aux outils de corrélation afin de mettre en évidence le lien existant entre les fluctuations de vitesse de l'écoulement et les fluctuations de pression pariétale d'une part, puis entre les fluctuations de vitesse et les fluctuations de pression acoustique d'autre part. La technique de mesure laser TR-PIV (Time Resolved Particle Image Velocimetry) à haute cadence d'échantillonnage est utilisée afin d'effectuer les mesures couplées aux mesures acoustiques.

Dans la suite, le montage expérimental ainsi que les outils de mesure et d'analyse sont présentés en partie 2. Ensuite, en partie 3, une qualification du montage expérimental est proposée, suivie par une analyse des liens entre les fluctuations du champ de vitesse et les fluctuations de l'énergie du bruit perçu. Les conclusions de l'étude sont données en partie 4.

## 2 Montage expérimental, outils de mesure et d'analyse

### 2.1 Dispositif expérimental

Dans le cadre de cette étude, l'ensemble des expériences ont été menées dans la soufflerie anéchoïque BETI (Bruit - Environnement - Transport - Ingénierie) de l'institut PPRIME à Poitiers. Le convergent de la soufflerie accélère l'écoulement jusqu'à la section de sortie ( $0.7 \times 0.7 \text{ m}^2$ ) selon un rapport de contraction de 10. L'écoulement débouche alors dans une veine d'essai ouverte puis est aspiré à travers un collecteur de dimensions  $0.9 \times 0.95 \text{ m}^2$ .

On utilise une planche de bois placée à 0.34 m de la section de sortie du convergent et de hauteur  $h = 0.03 \text{ m}$  afin de générer un écoulement de marche montante. L'envergure de la marche est de 1.2 m. Cet écoulement sert de source aéroacoustique rayonnant dans un caisson anéchoïque

situé en dessous d'une vitre de dimensions  $0.46 \times 0.2 \text{ m}^2$  et d'épaisseur 2 mm placée juste en aval de la marche et servant à modéliser la transmission des fluctuations de bruit. Cette vitre est retirée et remplacée par une plaque instrumentée afin d'effectuer des mesures de pression pariétale instationnaire. Un caisson anéchoïque est placée sous la vitre, autorisant des mesures de caractérisation du champ acoustique transmis par la vitre. Un microphone y est installé. Celui-ci est fixé à l'aide d'une barre métallique au centre du caisson et 10 cm en dessous de la vitre.

Un dispositif actif (volet) de dimensions  $1 \times 0.12 \text{ m}^2$  est fixé au niveau du convergent (Figure 1) et permet de générer par obstruction de la section de la veine d'essai une modulation de la vitesse incidente de l'ordre de 6%. Celle-ci s'accompagne d'une variation du taux de turbulence de 0.3% à approximativement 2%. Un bras de maniement est utilisé afin d'activer manuellement le volet. Un capteur d'angle est fixé au niveau du volet afin d'en connaître la position au cours de son mouvement. Les résultats présentés dans cet article concernent le mouvement de fermeture du volet, c'est-à-dire la génération d'une augmentation rapide de vitesse incidente. La position horizontale du volet correspond à l'angle  $0^\circ$  alors que la position verticale correspond à l'angle  $-90^\circ$ . Le mouvement de fermeture se fait donc de la position  $0^\circ$  à la position  $-90^\circ$ .

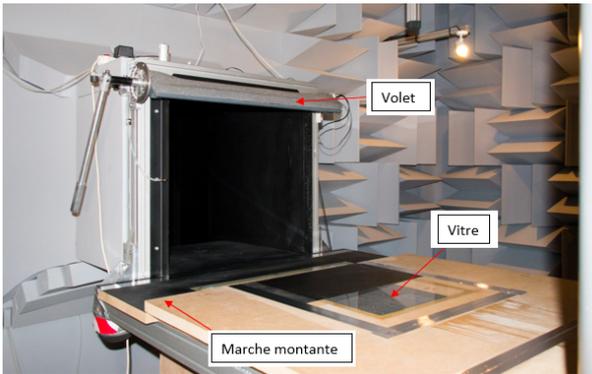


FIGURE 1 – Montage expérimental dans la soufflerie BETI.

## 2.2 Métrologie

On utilise pour mener à bien la présente étude trois outils métrologiques :

### Champ de vitesse :

La caractérisation du champ de vitesse est effectuée à l'aide de la technique laser TR-PIV. On utilise un laser Pegasus afin d'illuminer les traceurs dans le plan de mesure. L'écoulement estensemencé à l'aide d'un générateur de fumée de spectacle. Une caméra CCD haute fréquence de type High-Speed Cameras développée par Lavisson est utilisée pour l'acquisition des images. La cadence d'acquisition des images est de 20 kHz. Le logiciel Davis est utilisé afin d'évaluer le déplacement des traceurs. Il s'agit d'un calcul d'intercorrélation multi-passes (3 passes) qui se termine avec une fenêtre de taille  $8 \times 8$ . Le taux de recouvrement est de  $50\% \times 50\%$  dans chaque direction.

### Pression pariétale instationnaire :

La mesure de la pression pariétale instationnaire est effectuée à l'aide de capteurs de pression déportés possédant

une bande passante allant de 20 Hz à 10 kHz. Ceux-ci sont donc tout indiqués pour une étude d'un phénomène acoustique haute fréquence. La correction en gain et phase des signaux acquis par le système de mesure est effectuée dans le domaine temporel afin d'obtenir une mesure fiable du chargement aérodynamique de la vitre. On utilise 16 capteurs tous disposés à mi-envergure en aval de la marche. Le premier est positionné à  $0.5h$  du bord de la marche. On impose un espacement constant en aval de la marche de  $0.5h$  entre les capteurs 1 à 12, soit jusqu'à  $6h$  en aval de la marche. Entre les capteurs 12 et 13, l'écart est de  $2h$  puis il est de  $3h$  entre les capteurs de 13 à 16, soit jusqu'à  $17h$ . 3 autres capteurs sont également positionnés en amont de la marche. On utilise une fréquence d'acquisition de 102.4 kHz pour l'acquisition simultanée des signaux.

### Champ acoustique intérieur :

On utilise dans le caisson anéchoïque un microphone de type 1/2 pouce de marque G.R.A.S. reliés à des préamplificateurs afin de mesurer le bruit transmis par la vitre. Un microphone 1/2 pouce 40AF également de marque G.R.A.S. reliés à des préamplificateurs 1/2 pouce 01 dB est utilisé pour caractériser le champ acoustique extérieur. Celui-ci est placé 1.2 m au-dessus de la marche. On utilise une fréquence d'acquisition de 102.4 kHz pour l'acquisition simultanée des signaux.

## 2.3 Outils d'analyse

Afin de caractériser la modulation d'amplitude du bruit dans le caisson, on définit un indicateur de bruit qui permet d'évaluer à court terme le moment d'ordre 2 du signal acoustique acquis à l'intérieur du caisson placé sous la vitre.

Cet indicateur se définit formellement comme suit :

$$\phi_{p'_a} = \sqrt{\frac{1}{N_{rms}} \sum_{n=1}^{N_{rms}} p_{an}^2} \quad (1)$$

$p'_{an}$  correspond au signal acoustique discret préalablement filtré par bande de tiers d'octave alors que  $N_{rms}$  correspond au nombre de points choisis pour calculer le moment d'ordre 2. Ce calcul est effectué pour une fenêtre temporelle  $\Delta T = T_m/2$ ,  $T_m = 0.1 \text{ s}$  étant l'échelle temporelle de variation du signal d'angle du volet lors de sa fermeture. Le glissement de la fenêtre est effectué tous les  $10^{-3} \text{ s}$ . Seule la bande de tiers d'octave 4 kHz est considérée dans cette étude [6, 7]. Cet indicateur peut-être également appliqué aux autres quantités fluctuantes d'intérêt, à savoir un signal de vitesse turbulente longitudinale dans l'écoulement et un signal de pression pariétale instationnaire. Les indicateurs ainsi calculés sont appelés respectivement  $\phi_{v'_x}$  et  $\phi_{p'}$ . Les indicateurs  $\phi_{p'_a}$ ,  $\phi_{p'}$  et  $\phi_{v'_x}$  sont donc des fonctions temporelles, estimant sur une bande de tiers d'octave donnée et sur une durée de fenêtre glissante de 0.01 s (sauf mention contraire), la variation des fluctuations énergétiques des quantités  $p'_a$ ,  $p'$  et  $v'_x$  : ils caractérisent donc la modulation d'amplitude de ces signaux large bande.

L'analyse du lien entre ces indicateurs se fait à l'aide des outils de corrélation définis comme suit :

$$\rho_{[\phi_{v'_x}, \phi_{p'}]} = \frac{cov(\phi_{v'_x}, \phi_{p'})}{\sigma_{\phi_{v'_x}} \sigma_{\phi_{p'}}} = \frac{E[(\phi_{v'_x} - \mu_{\phi_{v'_x}})(\phi_{p'} - \mu_{\phi_{p'}})]}{\sigma_{\phi_{v'_x}} \sigma_{\phi_{p'}}} \quad (2)$$

$$\rho_{[\phi_{v'_x}, \phi_{p'_a}]} = \frac{cov(\phi_{v'_x}, \phi_{p'_a})}{\sigma_{\phi_{v'_x}} \sigma_{\phi_{p'_a}}} = \frac{E[(\phi_{v'_x} - \mu_{\phi_{v'_x}})(\phi_{p'_a} - \mu_{\phi_{p'_a}})]}{\sigma_{\phi_{v'_x}} \sigma_{\phi_{p'_a}}}, \quad (3)$$

où  $\sigma_a$  désigne l'écart-type de la quantité  $a$ . Les Équations (2) et (3) définissent, respectivement, les coefficients de corrélation entre d'un côté l'indicateur de vitesse fluctuante au voisinage de la marche (mesurée par TR-PIV), et de l'autre l'indicateur de fluctuations de pression pariétale et acoustique.

### 3 Résultats

#### 3.1 Qualification aérodynamique et acoustique du montage : effet de la position du volet

L'interaction d'un écoulement avec une marche montante crée une structuration aérodynamique complexe présentant une forte dépendance aux conditions expérimentales (caractéristiques de la couche limite incidente ...). Celle-ci est détaillée sur la Figure 2. La topologie moyenne présentée est constituée de deux structures aérodynamiques tourbillonnaires, l'une en amont de la marche et l'autre en aval.

Le tourbillon de pied de marche provient du décollement de la couche limite incidente, celle-ci étant sujet à un fort gradient de pression adverse due à la présence de la marche.

La formation de la bulle de recirculation en aval de la marche provient du deuxième décollement de l'écoulement au niveau du bord de la marche. La longueur de recollement  $L_R$  de cette structure est de  $2.93h$  alors que la hauteur  $H_R$  de celle-ci est de  $0.4h$  pour une vitesse incidente de  $40 \text{ m.s}^{-1}$ . L'augmentation de la vitesse incidente a pour effet de diminuer cette longueur de recollement puisque pour  $30 \text{ m.s}^{-1}$   $L_R$  vaut  $3.27h$  et à  $50 \text{ m.s}^{-1}$   $L_R$  vaut  $2.6h$ .

L'effet de la position du volet a été évalué sur l'écoulement à mi-envergure de la marche. Dans ce qui suit, la marche est positionnée à l'origine de l'axe  $X$ ,  $X=0$ . L'axe  $X$  est orienté selon le sens de l'écoulement. La Figure 3 compare la norme du champ de vitesse entre les configurations volet ouvert et fermé. Le résultat montre que seules les zones de l'écoulement situés au-dessus des deux bulles de recirculation sont sensibles à la position du volet. On note jusqu'à  $8 \text{ m.s}^{-1}$  de survitesse au-dessus de la bulle de recirculation en aval de la marche.

L'effet de la position du volet sur le niveau de fluctuation de pression pariétale mesuré à mi-envergure de la marche est évalué sur la Figure 4 pour la bande de tiers d'octave 4 kHz. On utilise pour cela l'indicateur de fluctuation  $\phi_p$  présenté dans la partie précédente avec néanmoins une taille de fenêtre  $\Delta T$  égale à 3 s, le volet étant statique. L'analyse des résultats permet de noter la faible sensibilité de la zone proche du tourbillon de pied de marche. En aval de la marche, on note que le maximum de la courbe  $\Delta\phi'_p$  est atteint pour  $X = 4.5h = 1.53L_R$ , soit légèrement en aval du point de recollement moyen. De plus, on note une légère diminution du niveau de fluctuation de pression en paroi entre 0 et  $h/2$  (de l'ordre de 10%). On associe ce résultat au mouvement de la bulle de recirculation produit par la sur-vitesse au droit

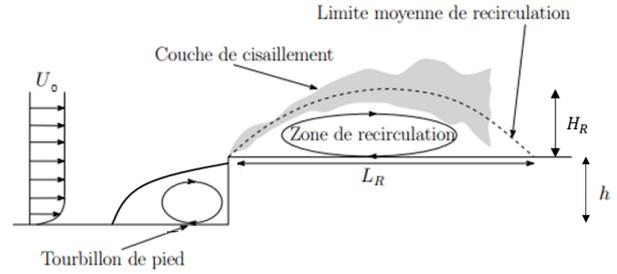


FIGURE 2 – Topologie moyenne de l'écoulement de marche montante. Adapté d'après Largeau [8] (2004).

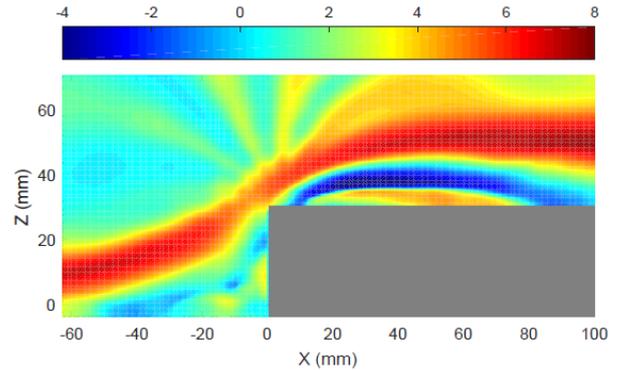


FIGURE 3 – Distribution de la différence de norme du champ de vitesse entre les positions ouverte et fermée du volet au voisinage de la marche. La vitesse incidente  $U_0$  vaut  $40 \text{ m.s}^{-1}$

de la marche (approximativement  $5 \text{ m.s}^{-1}$ ).

L'évaluation du bruit propre du volet perçu dans le caisson est effectuée à l'aide des résultats présentés sur la Figure 5. On considère pour cela une approche globale afin d'obtenir une courbe d'évolution du bruit mesuré en fonction de la vitesse incidente  $U_0$ . La quantité acoustique considérée est un niveau acoustique intégré entre 300 Hz et 10 kHz : on la nomme  $L_g$ . Cette courbe est obtenue en trois étapes. L'évolution du bruit est tout d'abord mesurée, soit  $L_g$  en fonction de la fréquence de consigne du variateur de la soufflerie  $f_c$  ( $f_c$  varie entre 20 et 45 Hz). La Figure 5a montre le résultat de cette mesure pour le champ acoustique intérieur et extérieur. Une fois cette courbe obtenue, on utilise un tube de pitot afin de mesurer pour chaque fréquence de consigne  $f_{Bet}$ , la vitesse  $U_0$  de l'écoulement incident à la marche pour les configurations de volet ouvert et fermé. L'équation linéaire associée à cette courbe s'écrit  $U_0 = 1.18*f_c$  et  $U_0 = 1.25*f_c$  respectivement pour les configurations de volet ouvert et fermé. Enfin, on utilise cette équation afin de recalculer le niveau global  $L_g$  avec la vitesse  $U_0$ . Le résultat est montré sur la Figure 5b. Pour une vitesse incidente  $U_0$  donnée, l'augmentation de niveau  $L_g$  quand le volet est fermé est d'environ 7 dB, ce qui indique que le bruit dû à l'interaction du volet et de l'écoulement est important à l'extérieur du caisson. En revanche, à l'intérieur du caisson, la hausse du niveau de bruit dû au volet est minimale ( $< 1 \text{ dB}$ ). On en déduit que le bruit propre du volet est très peu perçu dans le caisson anéchoïque, et que les variations de bruit seront donc dues essentiellement aux phénomènes aérodynamiques en jeu au voisinage de la marche. On note également que

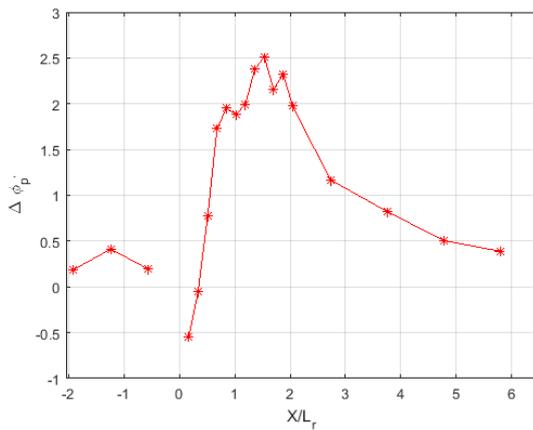


FIGURE 4 – L'indicateur  $\Delta\phi_{p'}$  indique la variation de l'indicateur  $\phi_{p'}$  entre les positions fermée et ouverte du volet pour  $U_0 = 40 \text{ m.s}^{-1}$  à mi-envergure de la marche.

l'écart de niveau perçu entre les positions ouverte et fermée du volet a tendance à s'atténuer à mesure que la vitesse augmente. En outre, la dynamique de bruit générée entre les deux positions du volet est d'approximativement 3 dB.

Enfin, la Figure 6 permet d'évaluer l'évolution du bruit mesuré dans la bande de tiers d'octave 4 kHz en fonction de la position du volet. Le temps d'intégration pour le calcul de  $\phi_{p'a}$  est de 30 s. On observe une sensibilité maximale du niveau sonore à la position du volet dans l'intervalle d'angle  $[-90; -40]^\circ$ , celui-ci augmentant d'environ 2 dB. Sur cette plage, le niveau sonore perçu dans le caisson augmente logiquement quand le blocage induit par le volet augmente, c'est-à-dire quand la vitesse de l'écoulement incident augmente. En revanche les fluctuations sur la plage d'angle  $[0; -40]^\circ$  sont plus difficiles à interpréter; il est probablement dû à un défaut dans la conception du caisson.

### 3.2 Analyse conjointe des indicateurs de fluctuation

Les Figures 7 et 8 représentent la distribution du coefficient de corrélation (défini en Eq. (2)) entre l'indicateur de vitesse fluctuante locale et l'indicateur de fluctuation de pression pariétale mesurée en un point précis, ici au niveau du point de recollement ( $X = L_R = 88 \text{ mm}$ ), pour deux configurations : une statique et une dynamique (*i.e.* mouvement de fermeture, donc une augmentation rapide de vitesse incidente). Le temps d'intégration est de 0.3 s, soit le temps d'évolution de l'indicateur entre l'état statique volet ouvert et l'état statique volet fermé. Alors que la cartographie correspondant à la configuration de volet ouvert ne laisse apparaître aucun niveau significatif de corrélation (Figure 7), la configuration du mouvement de fermeture (Figure 8) montre un niveau de corrélation proche de 60% dans la bulle de recirculation en aval de la marche. Ce niveau de corrélation est donc lié à un phénomène instationnaire induit par le mouvement du volet, c'est-à-dire par un changement rapide de la vitesse incidente sur la marche. La cartographie de la Figure 8 indique ainsi que l'instationnarité de l'énergie du chargement de la vitre au niveau du point de recollement est le fruit de l'instationnarité des phénomènes

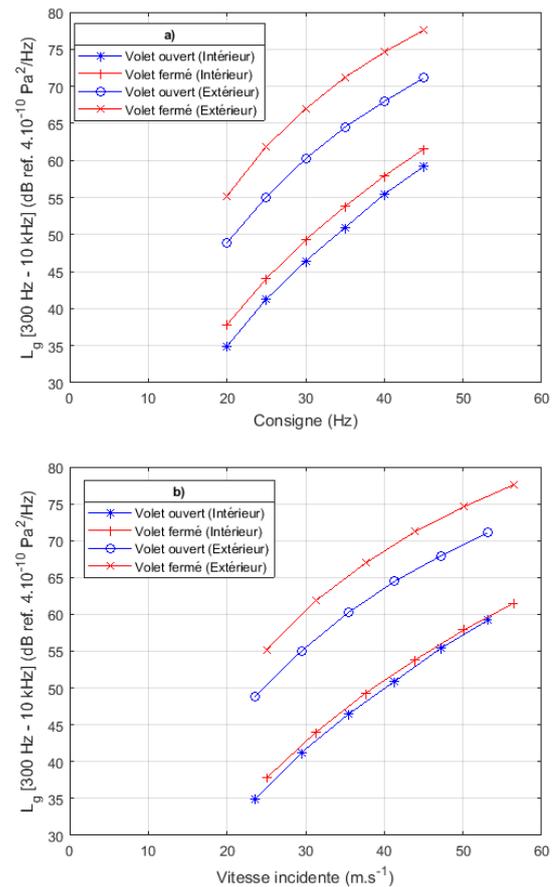


FIGURE 5 – Niveau acoustique intégré entre 0.3 et 10 kHz en fonction de : (a) la fréquence de consigne  $f_c$ ; (b) la vitesse incidente  $U_0$ .

aérodynamiques contenus dans la bulle de recirculation.

En se rapprochant du bord de la marche, *i.e.* à  $X = 0.5L_R$ , on note un niveau de corrélation en légère baisse de l'ordre de 50% dans la bulle de recirculation et dans la zone située juste au-dessus de celle-ci (Figure 9). Par ailleurs, le niveau de corrélation dans la zone située au-dessus de la bulle de recirculation est négatif, indiquant une évolution en opposition de phase entre l'indicateur de pression en paroi et l'indicateur de vitesse dans cette zone. Enfin, un niveau de corrélation de 40% est trouvée dans la zone située au-dessus du tourbillon de pied de marche. Ceci indique la sensibilité de la modulation du signal de pression pariétale proche de ce capteur aux variations de l'amplitude de fluctuation de la vitesse dans cette zone. Ce dernier point est lié au contournement de l'écoulement au-dessus de la marche du au mouvement de fermeture du volet. L'importance de cet aspect augmente lorsque l'on se situe tout proche du bord de la marche, *i.e.* à  $X = 0.17L_R$  (Figure 10). En effet, la sensibilité de la modulation du signal de pression pariétale aux variations de l'amplitude de fluctuation de la vitesse dans la bulle de recirculation s'atténue fortement. Un niveau de corrélation de l'ordre de 40% est associé aux fluctuations de vitesse lié au contournement de la marche par l'écoulement. Ce résultat s'explique par le mouvement de la bulle de recirculation lorsque le volet se ferme. En effet, le capteur étudié ne se trouvant plus sous la bulle de recirculation, celui-ci devient plus sensible aux fluctuations de vitesse externes à la bulle et liées au contournement de la

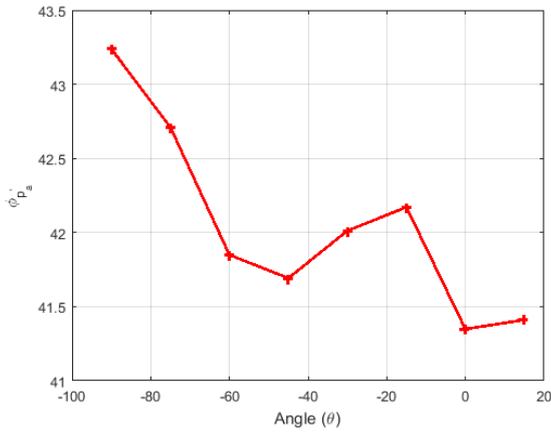


FIGURE 6 – Effet de la position du volet sur le bruit intérieur pour la bande de tiers d’octave 4 kHz : vitesse incidente  $U_0 = 40 \text{ m.s}^{-1}$

marche par l’écoulement.

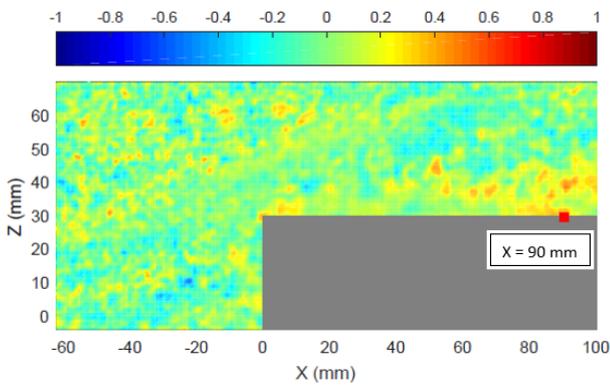


FIGURE 7 – Corrélation  $\rho_{[\phi_{v_x}, \phi_{p_w}]}$  des indicateurs de fluctuations de vitesse et de pression pariétale pour le volet en position ouverte à  $U_0 = 40 \text{ m.s}^{-1}$  : bande de tiers d’octave 4 kHz. Capteur de pression pariétale à  $X = 1.02L_R = 90 \text{ mm}$ .

On applique la même procédure d’analyse aux mesures couplées de vitesse et de bruit dans le caisson. Les Figures 11 et 12 exposent les résultats du calcul du coefficient de corrélation  $\rho_{[\phi_{v_x}, \phi_{p_w}]}$  (Eq. (4)) pour les configurations statique (volet ouvert) et dynamique (mouvement de fermeture). Un faible niveau de corrélation entre les indicateurs est noté pour la configuration statique du volet, ce qui est attendu car le niveau de bruit mesuré dans le caisson est stable quand l’écoulement est stationnaire (volet statique). Concernant le mouvement de fermeture, la cartographie du coefficient de corrélation indique que c’est l’instationnarité hydrodynamique dans la couche de cisaillement qui est responsable des fluctuations de bruit perçues dans l’habitacle. Le niveau de corrélation est de l’ordre de 50 à 60 %. Proche du bord de la marche, un niveau de corrélation d’approximativement 40% est observé, mais avec un signe négatif. L’activité instationnaire dans la bulle de recirculation n’est donc liée aux fluctuations du bruit interne que dans une zone très proche du bord de la marche. On attribue ce résultat au mouvement de la bulle de recirculation mentionné précédemment.

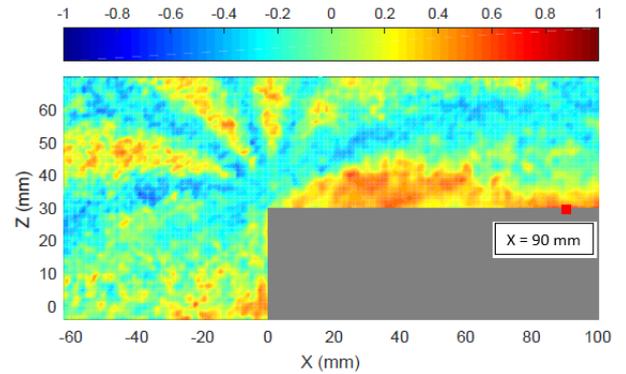


FIGURE 8 – Corrélation  $\rho_{[\phi_{v_x}, \phi_{p_w}]}$  des indicateurs de fluctuations de vitesse et de pression pariétale pour le mouvement de fermeture du volet à  $U_0 = 40 \text{ m.s}^{-1}$  : bande de tiers d’octave 4 kHz. Capteur de pression pariétale à  $X = 1.02L_R = 90 \text{ mm}$ .

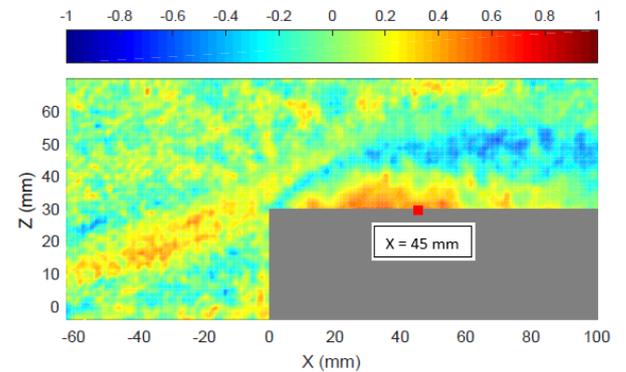


FIGURE 9 – Corrélation  $\rho_{[\phi_{v_x}, \phi_{p_w}]}$  des indicateurs de fluctuations de vitesse et de pression pariétale pour le mouvement de fermeture du volet à  $U_0 = 40 \text{ m.s}^{-1}$  : bande de tiers d’octave 4 kHz. Capteur de pression pariétale à  $X = 0.51L_R = 45 \text{ mm}$ .

## 4 Conclusion

Ce travail a permis d’évaluer à travers la conception d’un montage expérimental simplifié, les mécanismes participant à la transmission des fluctuations de bruit dans un habitacle automobile. Ces fluctuations de bruit sont associées à la gêne acoustique perçue par le conducteur et sont décrites comme une modulation du niveau acoustique dans l’habitacle. Un indicateur de fluctuation défini comme une estimation à court terme du niveau de fluctuation énergétique dans la bande de tiers d’octave est appliqué afin de caractériser cette gêne. Cet indicateur est appliqué aux différentes quantités fluctuantes : vitesse turbulente longitudinale, pression pariétale, pression acoustique.

L’effet de la position du volet a été évalué d’une part sur l’écoulement moyen et d’autre part sur le niveau de fluctuation de pression sur le vitrage. L’analyse des champs de vitesse par TR-PIV a montré les zones de survitesse créés lorsque le volet est en position fermée. Celle-ci peut atteindre  $8 \text{ m.s}^{-1}$  en aval de la marche au-dessus de la bulle. Ceci a pour conséquence de diminuer le niveau de fluctuation de pression pariétale dans la zone située directement en aval du bord de la marche.

L’analyse de la corrélation des indicateurs de vitesse turbulente longitudinale et de pression pariétale a permis de mettre en évidence le lien entre la modulation d’amplitude du

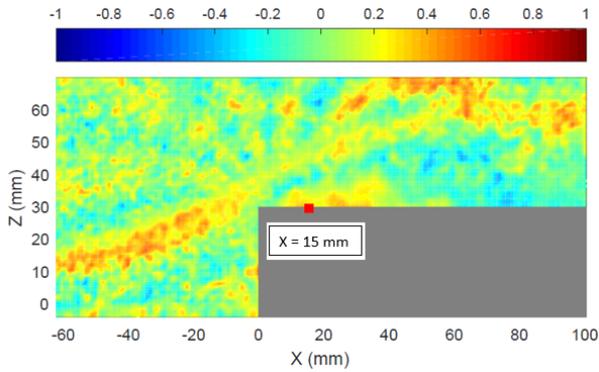


FIGURE 10 – Corrélation  $\rho_{[\phi_{v_x}, \phi_{p'}]}$  des indicateurs de fluctuations de vitesse et de pression pariétale pour le mouvement de fermeture du volet à  $U_0 = 40 \text{ m.s}^{-1}$  : bande de tiers d'octave 4 kHz. (Capteur de pression pariétale à  $X = 0.17L_R = 15 \text{ mm}$ )

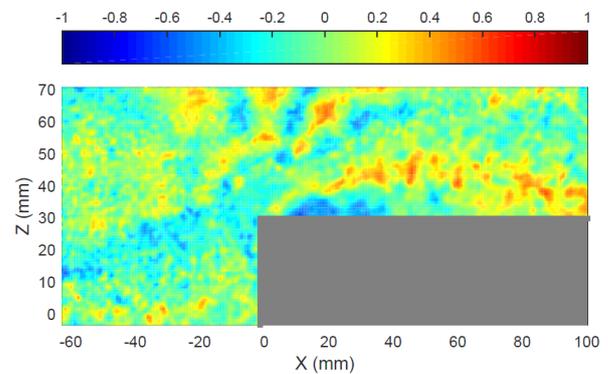


FIGURE 12 – Corrélation  $\rho_{[\phi_{v_x}, \phi_{p'_a}]}$  des indicateurs de fluctuations de vitesse et de pression acoustique pour le mouvement de fermeture à  $U_0 = 40 \text{ m.s}^{-1}$  : bande de tiers d'octave 4 kHz.

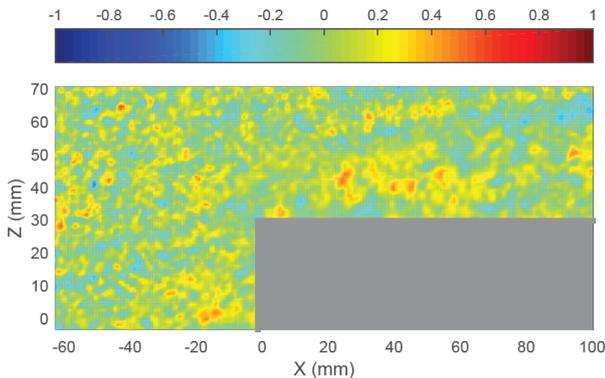


FIGURE 11 – Corrélation  $\rho_{[\phi_{v_x}, \phi_{p'_a}]}$  des indicateurs de fluctuations de vitesse et de pression acoustique pour le volet en position ouverte à  $U_0 = 40 \text{ m.s}^{-1}$  : bande de tiers d'octave 4 kHz.

signal de pression pariétale avec la modulation d'amplitude de la vitesse fluctuante longitudinale dans la bulle de recirculation en aval de la marche. Ce lien a cependant tendance à s'atténuer à mesure que l'on se rapproche du bord de la marche. Lorsque l'on est proche du bord de celle-ci, les modulations d'amplitude de la pression pariétale sont sensibles aux modulations d'amplitude du signal de vitesse liées au contournement de l'écoulement autour de la marche.

Une analyse similaire est appliquée afin d'étudier le lien entre les indicateurs de vitesse et de bruit intérieur. Cette étude met en évidence le rôle des fluctuations de vitesse dans la couche de cisaillement en aval de la marche dans la transmission des fluctuations de bruit dans le caisson. En outre, seules les fluctuations de vitesse liées au mouvement de la bulle de recirculation proche du bord de la marche sont liées aux fluctuations de bruit transmises dans le caisson.

## Remerciements

Les auteurs remercient Laurent Philippon, Janick Laumonier, Pascal Biais, Pascal Braud et J-C Vergez pour le soutien technique apporté à cette étude. Celle-ci s'inscrit dans le cadre d'une thèse de doctorat financée par l'OpenLab Fluidics.

## Références

- [1] M. Helfer, M. Riegel, J. Wiedemann, *The effect of turbulence on in-cabin wind noise - a comparison of road and wind tunnel results*, In proceeding. 6<sup>th</sup> MIRA International Conference on Vehicle Aerodynamics, Gaydon, UK (2006).
- [2] W. H. Hucho, G. Sovran, *Aerodynamic of road vehicles*, Annu. Rev. of Fluid Mech., Vol. 25, pp. 485-537 (1993).
- [3] A. R. George, *Automobile aerodynamic noise*, SAE Technical Paper, 900315 (1990).
- [4] H. Fastl, E. Zwicker, *Psychoacoustics : facts and models*, Springer, Berlin, 3<sup>ème</sup> édition (2007).
- [5] R. Bessis, *Analyse expérimentale des contributions aérodynamiques à la transmission acoustique dans un véhicule*, Thèse de doctorat, Université de Poitiers (2014).
- [6] M. Lindener, H. Miehling, A. Cogotti, F. Cogotti, M. Maffei, *Aeroacoustic measurements in turbulent flow on the road and in the wind tunnel*, SAE Technical Paper, SP-2066 (2007-01-1551) (2007).
- [7] R. Oettle, *The Effects of Unsteady On-Road Flow Conditions on Cabin Noise*, Thèse de doctorat, Durham University (2013).
- [8] J. F. Largeau, *Étude expérimentale de la dynamique et du rayonnement acoustique d'un écoulement de marche montante.*, Thèse de doctorat, Université de Poitiers (2004).
- [9] R. Martinuzzi, C. Troppea, *The Flow Around Surface-Mounted, Prismatic Obstacles Placed in a Fully Developed Channel Flow*, J. Fluids Eng., Vol. 115, pp.85-92 (1993).