

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

**Christian Zumu-Doli, Vincent Valeau,
Laurent Brizzi, Jean-Christophe Valière**
Institut PPRIME UPR 3346,
CNRS-Université de Poitiers-ENSMA
B17 - 6, rue Marcel Doré
86022 Poitiers CEDEX
E-mail : vincent.valeau@univ-poitiers.fr

Hervé Lazure, François Van Herpe
PSA Groupe
Innovel Parc Sud
Route de Gisy
Case Courrier VV1405 - CTV A
78943 Vélizy Villacoublay CEDEX

Résumé

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 aérodynamiques et acoustiques en jeu, afin de pouvoir à terme en tirer des règles de conception pour les futurs véhicules. Un banc d'essai est conçu en soufflerie anéchoïque 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 servant 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 l'énergie de la pression pariétale et de celles du niveau de bruit intérieur. L'étude a permis de mettre en évidence un effet d'instationnarité lié à une augmentation rapide de la vitesse incidente (mouvement de fermeture du volet). La fluctuation du chargement aérodynamique de la vitre sous la bulle de recirculation est logiquement liée à l'activité instationnaire de cette dernière. Néanmoins en s'approchant du bord de la marche et en s'éloignant de la bulle en aval, le chargement aérodynamique de la vitre est lié, respectivement, aux fluctuations de vitesse dans la zone de cisaillement au voisinage de l'arête de la marche, et au lâcher tourbillonnaire en aval. Enfin, le bruit transmis dans le modèle d'habitacle est principalement lié aux fluctuations de vitesse dans la couche de cisaillement.



Les paramètres d'esthétisme et de sécurité ont plus d'impact 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'ensuit 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 [1]). 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 [2], 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 [2]. 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 les fluctuations temporelles 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 de champs de vitesse couplées aux mesures de pression pariétale et acoustique. 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 de la pression pariétale et du bruit perçu. Les conclusions de l'étude sont données en partie 4.

Montage expérimental, outils de mesure et d'analyse

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, une soufflerie conçue pour l'étude et l'optimisation de l'écoulement autour d'obstacles et du rayonnement acoustique associé. La soufflerie BETI vise des applications dans le domaine des transports terrestres ou aériens et des équipements des bâtiments. La vitesse maximale de soufflage atteint $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (215 km/h environ). Le convergent de la soufflerie accélère l'écoulement jusqu'à la section de sortie ($0,7 \times 0,7 \text{ m}$) 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 $0,9 \times 0,95 \text{ m}$.

On utilise une planche de bois placée à $0,34 \text{ m}$ de la section de sortie du convergent et de hauteur $h = 0,03 \text{ m}$ afin de générer un écoulement de marche montante (Figure 1). L'envergure de la marche est de $1,2 \text{ m}$. Cet écoulement sert de source aéroacoustique rayonnant dans un caisson anéchoïque situé en dessous d'une vitre de dimensions $0,46 \times 0,2 \text{ m}$ et d'épaisseur 2 mm placée juste en aval de la marche et servant à modéliser la transmission des fluctuations de bruit. Cette vitre peut être retirée et remplacée par une plaque rigide instrumentée afin d'effectuer des mesures de pression pariétale instationnaire. Un caisson anéchoïque est placé sous la vitre, autorisant des mesures de caractérisation du champ acoustique transmis par la vitre. Un microphone y est installé, fixé à l'aide d'une barre métallique en son centre et à 10 cm en dessous de la vitre.

Un dispositif actif (volet) de dimensions $1 \times 0,12 \text{ m}$ est fixé au niveau du convergent 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% en un intervalle de temps de l'ordre $0,1 \text{ s}$. Cette modulation de vitesse s'accompagne d'une variation du taux de turbulence de $0,3 \%$ à approximativement 2% . Un bras de manœuvre 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° alors que la position verticale correspond à l'angle -90° . Le mouvement de fermeture se fait donc de la position 0° à la position -90° .

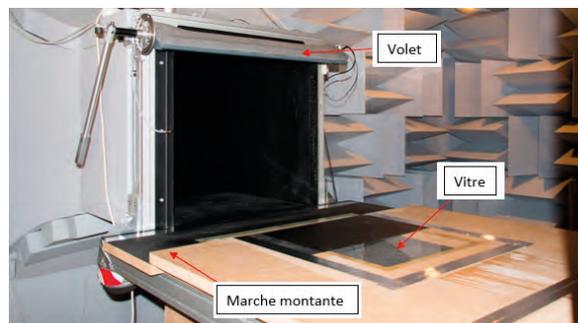


Fig. 1 : Montage expérimental dans la soufflerie BETI

Métrologie

Pour mener à bien la présente étude, on utilise trois outils métrologiques présentés ci-dessous.

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 est ensemencé à l'aide d'un générateur de fumée de spectacle (diamètre moyen des particules : 1 mm). Deux caméras CCD haute fréquence de type High-Speed Cameras développées par Lavision sont utilisées pour l'acquisition des images ; elles permettent l'estimation du champ de vitesse dans un plan vertical perpendiculaire à la marche, de hauteur 70 mm et de longueur 410 mm (dans le sens de l'écoulement). 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 (trois passes) qui se termine avec une fenêtre de taille 12×12 pixels. Le taux de recouvrement est de 50% \times 50% dans chaque direction. Le système de TR-PIV est synchronisé avec l'acquisition de la pression acoustique (pour étudier simultanément la transmission acoustique vers le caisson au travers de la vitre), ou de la pression pariétale (pour étudier simultanément le chargement aérodynamique). Dans ce dernier cas, comme expliqué plus haut, une plaque instrumentée rigide est installée à la place de la vitre.

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 en 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 seize 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. Trois autres capteurs sont également positionnés en amont de la marche. On utilise une fréquence d'échantillonnage 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. (modèle 40AF) afin de mesurer le bruit transmis par la vitre. Un microphone 1/2 pouce Rion (modèle UC59) 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'échantillonnage de 102,4 kHz pour l'acquisition simultanée des signaux. Le bruit mesuré dans le caisson est de nature large bande.

Outils d'analyse

Dans cette étude, on utilise un indicateur temporel (noté $\Phi_a(t)$) qui permet d'évaluer les fluctuations temporelles de l'énergie du bruit (dont le spectre est à large bande) contenue dans une bande de tiers d'octave donnée. Cet indicateur (défini ci-dessous en Eq. (1)) réalise à court terme le calcul de la racine carrée du moment d'ordre 2 (ou valeur efficace) du signal acoustique $p_a(t)$ (de valeur moyenne nulle) acquis à l'intérieur du caisson placé sous la vitre et préalablement filtré dans une bande de tiers d'octave :

$$\Phi_a(t) = \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_{t-\Delta T/2}^{t+\Delta T/2} [p_a(t')]^2 dt'} \quad (1)$$

Ce calcul est effectué pour une fenêtre temporelle de durée $\Delta T = T_m/2$, $T_m = 0,1$ s étant l'échelle temporelle de l'augmentation de vitesse incidente générée par un mouvement de fermeture du volet. Le glissement de la fenêtre est effectué tous les 10^{-3} s. Seule la bande de tiers d'octave 4 kHz est considérée dans cette étude. En effet, le bruit d'origine aérodynamique est jugé particulièrement gênant dans cette bande d'octave [6,7]. À l'aide de cet indicateur temporel, on peut ainsi suivre les fluctuations de bruit dues à des variations de vitesse de l'écoulement incident sur la marche.

Cet indicateur peut-être également appliqué aux autres quantités fluctuantes d'intérêt, à savoir un signal de vitesse turbulente longitudinale dans l'écoulement (composante dans le sens de l'écoulement incident, mesurée par TR-PIV), et un signal de pression pariétale instationnaire. Pour résumer, les indicateurs ainsi calculés sont notés respectivement $\Phi_a(t)$ (pression acoustique), $\Phi_p(t)$ (pression pariétale) et $\Phi_v(t)$ (vitesse turbulente) : ils caractérisent, dans la bande de tiers d'octave 4 kHz, les fluctuations tempo-

relles de l'énergie des signaux large bande associés à la mesure de ces trois quantités physiques.

L'analyse du lien entre ces indicateurs se fait à l'aide d'outils de corrélation. On définit les coefficients de corrélation vitesse-acoustique interne d'une part (noté $\rho_{[\Phi_v, \Phi_a]}$), et vitesse-pression pariétale d'autre part (noté $\rho_{[\Phi_v, \Phi_p]}$), selon :

$$\rho_{[\Phi_v, \Phi_a]} = \frac{E[(\Phi_v - E[\Phi_v])(\Phi_a - E[\Phi_a])]}{\sigma_{\Phi_v} \sigma_{\Phi_a}} \quad (2)$$

$$\rho_{[\Phi_v, \Phi_p]} = \frac{E[(\Phi_v - E[\Phi_v])(\Phi_p - E[\Phi_p])]}{\sigma_{\Phi_v} \sigma_{\Phi_p}} \quad (3)$$

où σ_a désigne l'écart-type de la quantité a, et $E[\dots]$ l'espérance mathématique d'une variable aléatoire. Cette dernière grandeur est estimée en utilisant la moyenne arithmétique des données après vérification d'une bonne répétabilité du processus de mesure. Les équations (2) et (3) définissent, respectivement, les coefficients de corrélation entre d'un côté l'indicateur de fluctuation d'énergie du signal de vitesse fluctuante au voisinage de la marche (mesurée par TR-PIV), et de l'autre l'indicateur de fluctuation d'énergie des pressions acoustique et pariétale. Ces coefficients sont compris entre -1 et +1.

Résultats

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 notamment). 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.

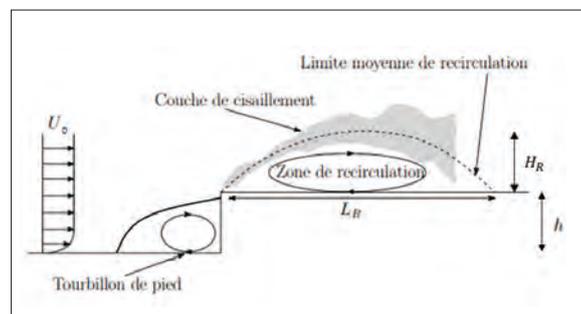


Fig. 2 : Topologie moyenne de l'écoulement de marche montante. Adapté d'après Largeau [8] (2004)

Le tourbillon de pied de marche provient du décollement de la couche limite incidente, celle-ci étant sujette 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 de l'arête de la marche.

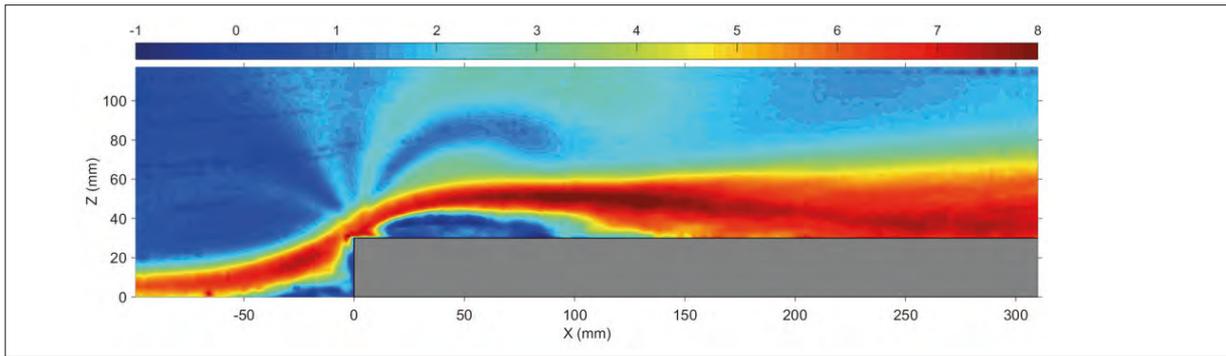


Fig. 3 : Distribution de la différence de norme du champ de vitesse moyen entre les positions fermée et ouverte du volet, au voisinage de la marche. La vitesse de l'écoulement incident vaut 40 m.s^{-1} . Une différence positive indique que la fermeture du volet génère localement une augmentation de la vitesse

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 m.s^{-1} (celle-ci tend à diminuer quand la vitesse augmente). Une couche de cisaillement fortement instationnaire est créée au-dessus de la bulle de recirculation, dans laquelle des tourbillons sont générés et convectés en aval de la bulle.

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 représente la différence de la norme du champ de vitesse entre les deux configurations volet ouvert et volet fermé. Le résultat montre que les zones de l'écoulement situées au-dessus des deux bulles de recirculation sont les plus sensibles à la position du volet. On note jusqu'à 8 m.s^{-1} de survitesse au-dessus de la bulle de recirculation en aval de la marche. La zone d'augmentation de la vitesse s'étend plus en aval dans une bande d'épaisseur approximativement égale à la hauteur de 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 de fréquence centrale 4 kHz . On calcule pour cela la valeur efficace (i.e., valeur moyenne quadratique) du signal de pression pariétale préalablement filtré dans cette bande, sur une durée d'intégration de 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 (i.e., $X < 0$). En aval de la marche, on note que la différence maximale est atteinte pour $X = 4,5h = 1,53 L_R$, soit légèrement en aval du point de recollement moyen. C'est donc dans cette zone que des variations rapides du chargement pariétal sont à attendre si la vitesse incidente sur la marche varie rapidement.

L'évaluation du bruit propre du volet perçu dans le caisson est effectuée à l'aide des résultats présentés sur la figure 5. La quantité acoustique considérée est un niveau acoustique intégré entre 300 Hz et 10 kHz , noté L_g ; on considère à la fois le niveau de bruit externe (mesuré hors écoulement à la verticale de la marche) et le niveau de bruit interne (mesuré dans le caisson).

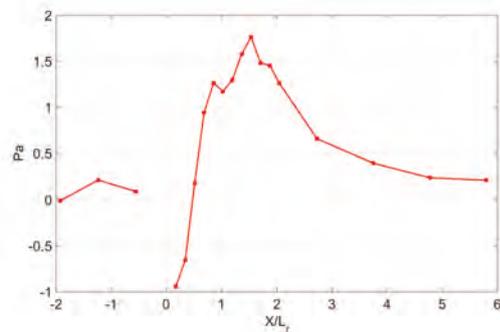


Fig. 4 : Variation de la valeur efficace du signal de pression pariétale en Pa, entre les configurations volet fermé et volet ouvert, pour une vitesse de 40 m.s^{-1} à mi-envergure de la marche. L'arête de la marche se situe à $X/L_R = 0$

L'évolution du niveau L_g est tout d'abord mesurée en fonction de la fréquence de consigne du variateur de la soufflerie (f_c varie entre 20 et 45 Hz , et est le paramètre de contrôle de la soufflerie), pour les configurations volet ouvert et volet fermé. La figure 5a présente le résultat de cette mesure pour les champs acoustiques interne et externe. Une fois cette courbe obtenue, on utilise un tube de Pitot afin de mesurer pour chaque valeur de la fréquence de consigne f_c , la vitesse de l'écoulement incident sur la marche pour les configurations de volet ouvert et fermé. À partir de ces données, il est ainsi possible de représenter les résultats de la figure 5a en fonction de la vitesse incidente cette fois (Figure 5b). Pour une vitesse incidente donnée, l'augmentation de niveau du bruit externe 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 (au maximum de 1 dB). On en déduit que le bruit propre du volet est très peu perçu dans le caisson anéchoïque, et que les variations du niveau de bruit interne seront donc dues essentiellement aux phénomènes aérodynamiques en jeu au voisinage de la marche. On note également que 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 .

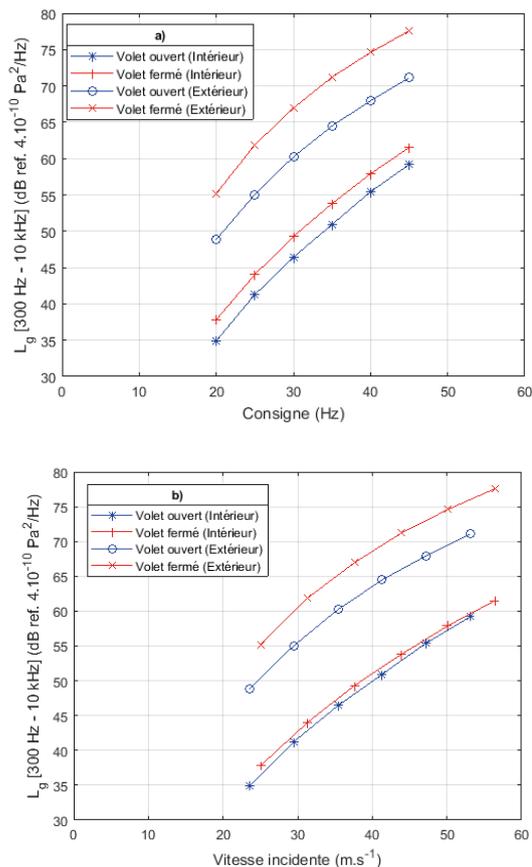


Fig. 5 : Niveau acoustique intégré entre 0,3 et 10 kHz en fonction de : (a) la fréquence de consigne f_c ; (b) la vitesse incidente

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 (sur un temps d'intégration 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.

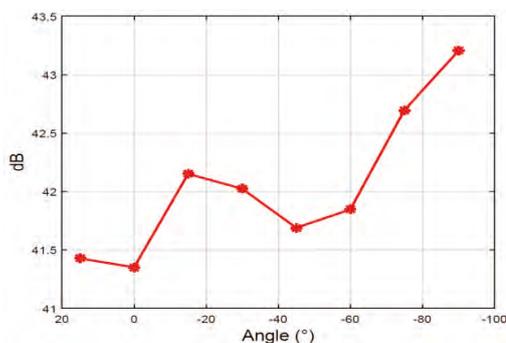


Fig. 6 : Effet de la position du volet sur le niveau de bruit intérieur en dB pour la bande de tiers d'octave 4 kHz et une vitesse de l'écoulement incident de 40 m.s^{-1}

Analyse conjointe des indicateurs de fluctuation

Les figures 7 et 8 représentent la distribution du coefficient de corrélation (défini en Eq. (3)) 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 ($X = 1,02L_R = 88 \text{ mm}$), pour deux configurations : une statique (volet ouvert) et une dynamique (i.e. mouvement de fermeture, donc une augmentation rapide de vitesse incidente).

Le temps d'intégration est de 0,3s, 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 excepté proche du capteur (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 et dans la zone située juste en aval du point de recollement moyen en proche paroi. Les différences observées entre les configurations indiquent l'existence d'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 aérodynamiques contenus dans la bulle de recirculation.

En se rapprochant du bord de la marche, i.e. à $X = 0,5L_R$, on note pour le mouvement de fermeture 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. Le capteur étant situé au centre de la bulle, ce comportement peut être associé à un mouvement global haute fréquence de la bulle. Enfin, un niveau de corrélation de 40 % est trouvé dans la zone située au-dessus du tourbillon de pied de marche. Ceci indique la sensibilité de la modulation du signal de pression pariétal 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 dû 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, on note l'existence d'une « traînée » de taches de corrélation positive proche de 60 % autour de l'arête de la marche. Ce résultat s'explique par un léger décalage de la bulle de recirculation vers l'aval lorsque le volet se ferme (ce phénomène peut être mis en évidence par des données non présentées dans cette étude). Ainsi, 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 marche par l'écoulement. Par ailleurs, l'évolution en opposition de phase des indicateurs n'est plus visible et on observe une tache de corrélation de l'ordre de 70 % située proche du capteur, indiquant une sensibilité des fluctuations de vitesse dans cette zone à un phénomène local plutôt qu'à un mouvement global de la bulle.

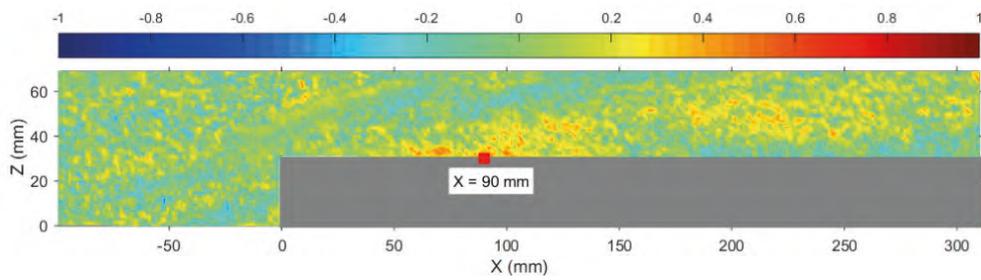


Fig. 7 : Distribution du coefficient de corrélation $\rho_{[\Phi_v, \Phi_p]}$ entre les indicateurs de fluctuations de vitesse et de pression pariétale pour le volet en position ouverte (statique) à 40 m.s^{-1} : bande de tiers d'octave 4 kHz. Le capteur de pression pariétale utilisé est situé à $X = 1,02L_R = 90 \text{ mm}$

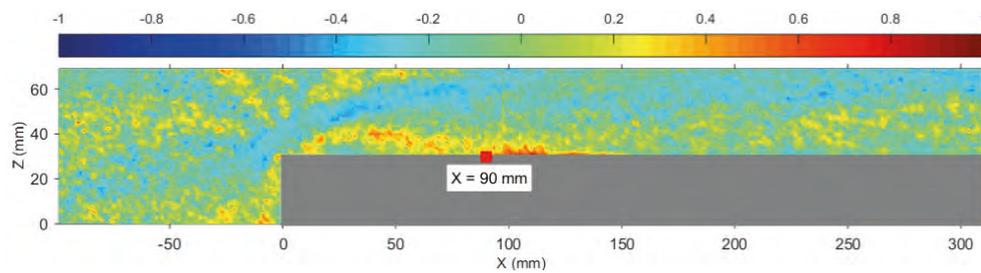


Fig. 8 : Distribution du coefficient de corrélation $\rho_{[\Phi_v, \Phi_p]}$ entre les indicateurs de fluctuations de vitesse et de pression pariétale pour le mouvement de fermeture du volet à 40 m.s^{-1} : bande de tiers d'octave 4 kHz. Le capteur de pression pariétale utilisé est situé à $X = 1,02L_R = 90 \text{ mm}$

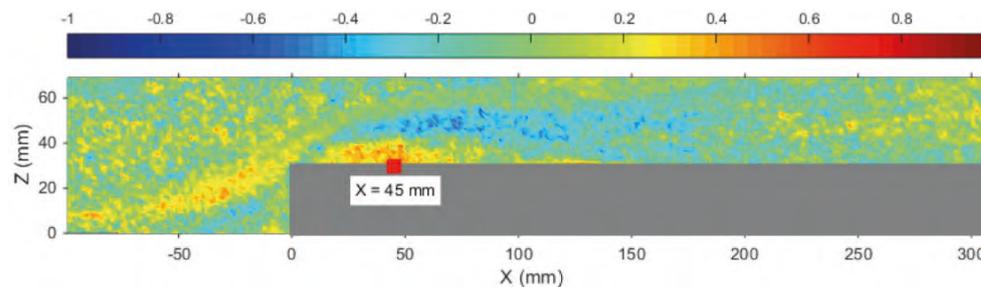


Fig. 9 : Distribution du coefficient de corrélation $\rho_{[\Phi_v, \Phi_p]}$ entre les indicateurs de fluctuations de vitesse et de pression pariétale pour le mouvement de fermeture du volet à 40 m.s^{-1} : bande de tiers d'octave 4 kHz. Le capteur de pression pariétale utilisé est situé à $X = 0,51L_R = 45 \text{ mm}$

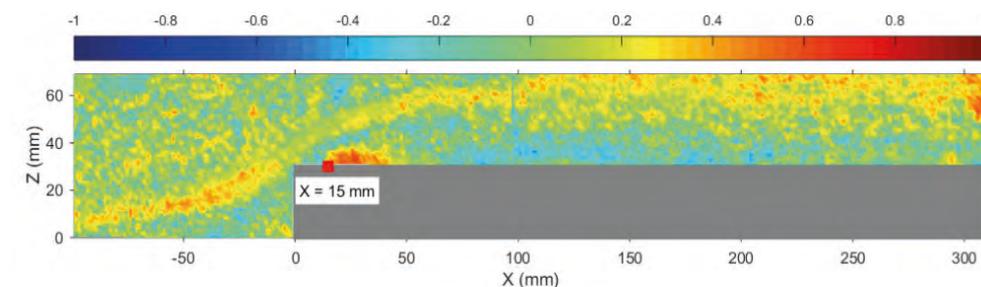


Fig. 10 : Distribution du coefficient de corrélation $\rho_{[\Phi_v, \Phi_p]}$ entre les indicateurs de fluctuations de vitesse et de pression pariétale pour le mouvement de fermeture du volet à 40 m.s^{-1} : bande de tiers d'octave 4 kHz. Le capteur de pression pariétale utilisé est situé à $X = 0,17L_R = 15 \text{ mm}$

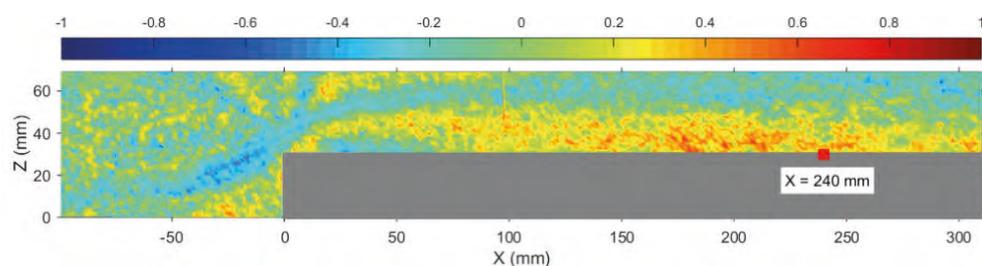


Fig. 11 : Distribution du coefficient de corrélation $\rho_{[\Phi_v, \Phi_p]}$ entre les indicateurs de fluctuations de vitesse et de pression pariétale pour le mouvement de fermeture du volet à 40 m.s^{-1} : bande de tiers d'octave 4 kHz. Le capteur de pression pariétale utilisé est situé à $X = 2,72 L_R = 240 \text{ mm}$

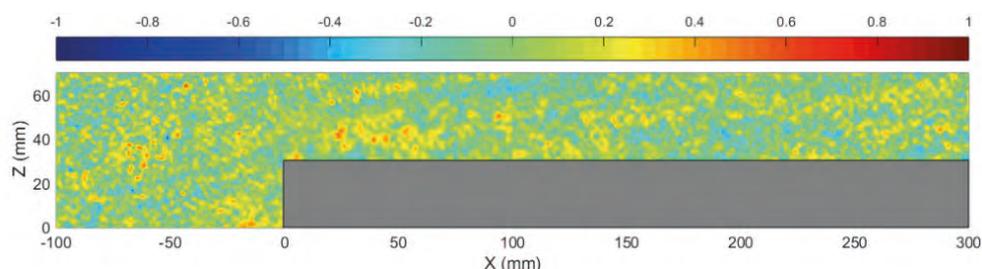


Fig. 12 : Distribution du coefficient de corrélation $\rho_{[\Phi_v, \Phi_a]}$ entre les indicateurs de fluctuations de vitesse et de pression acoustique interne pour le volet en position ouverte (statique) à 40 m.s^{-1} : bande de tiers d'octave 4 kHz

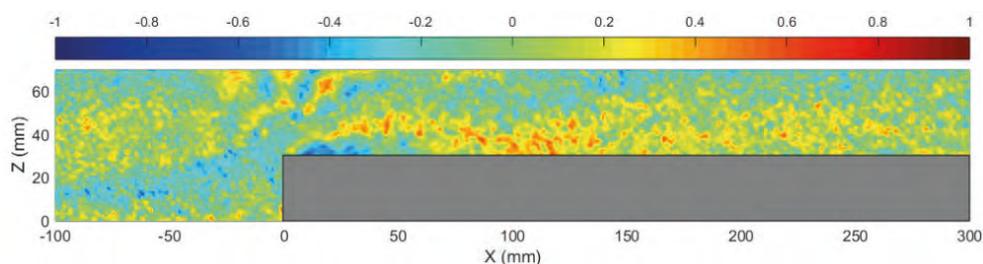


Fig. 13 : Distribution du coefficient de corrélation $\rho_{[\Phi_v, \Phi_a]}$ entre les indicateurs de fluctuations de vitesse et de pression acoustique interne pour le mouvement de fermeture à 40 m.s^{-1} : bande de tiers d'octave 4 kHz

La figure 11 montre la distribution du coefficient de corrélation obtenue pour un capteur situé à $X = 2,7L_R$, c'est-à-dire loin en aval de la bulle de recirculation moyenne. On note la présence de nombreuses taches de corrélation localisées en aval, proche de la paroi de la marche et sur une hauteur allant jusqu'à 10 mm au-dessus de cette paroi exceptée dans la bulle de recirculation. Ce résultat est lié au phénomène aérodynamique dominant en dehors de la bulle : le lâcher tourbillonnaire. Celui-ci est en effet le principal responsable du chargement aérodynamique en paroi, en dehors de la bulle et permet d'expliquer l'existence d'une vaste zone de corrélation. Par ailleurs, l'augmentation du niveau de corrélation associé à ces taches en s'éloignant du droit de la marche peut s'expliquer par le fait qu'il existe un temps nécessaire à la formation de ces tourbillons.

La même procédure d'analyse est appliquée aux mesures couplées de vitesse et de bruit dans le caisson. Les figures 12 et 13 exposent les résultats du calcul du coefficient de corrélation (Eq. (2)) 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, Figure 12). 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 (Figure 13). 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 également 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. Ce résultat pourrait être dû au mouvement de la bulle de recirculation mentionné précédemment. Enfin, on note l'existence de niveaux de corrélation également de l'ordre de 50 à 60 % en aval du point de recollement moyen, indiquant le lien entre les fluctuations rapides du point de recollement moyen de l'écoulement et les fluctuations de bruit intérieur.

Conclusion

Ce travail a permis d'évaluer, à travers la conception d'un montage expérimental simplifié basé sur une marche montante en écoulement de soufflerie, les mécanismes participant à la transmission des fluctuations de bruit dans un habitacle automobile lorsque la vitesse incidente varie. 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 temporelle, défini comme une estimation à court terme du niveau de fluctuation énergétique dans une bande de tiers d'octave donnée (dans cette étude la bande centrée sur 4 kHz est considérée), 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 générant les variations de vitesse incidente 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 créées lorsque le volet est en position fermée. Celle-ci peut atteindre 8 m.s^{-1} en aval de la marche au-dessus et en aval 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, mais de l'augmenter sensiblement plus en aval.

Dans le cas d'une augmentation rapide de la vitesse incidente sur la marche (fermeture du volet), l'analyse de la corrélation des indicateurs de vitesse turbulente longitudinale et de pression pariétale a permis de mettre en évidence le lien les fluctuations d'énergie du signal de pression pariétale et celles 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 fluctuations d'énergie du signal de pression pariétale sont sensibles aux fluctuations de vitesse dans la zone de cisaillement créée par le contournement de la marche par l'écoulement. En revanche, plus en aval de la bulle de recirculation, le chargement pariétal est sous l'influence du lâcher tourbillonnaire.

Une analyse similaire est appliquée afin d'étudier le lien entre les indicateurs de vitesse et de bruit intérieur, dans le cas d'une augmentation rapide de vitesse incidente. L'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. Le rôle des fluctuations du point de recollement moyen est également mis en évidence dans la transmission du bruit.

Remerciements

Les auteurs remercient chaleureusement Laurent Philippon, Janick Laumonier, Pascal Biais, Philippe Szeger, Patrick Braud, et J-C Vergez pour le soutien technique apporté à cette étude, ainsi que Théo Martin pour son aide dans la production des cartographies des coefficients de corrélation. Cette étude s'inscrit dans le cadre d'une thèse de doctorat financée par l'OpenLab Fluidics.

Références bibliographiques

- [1] W. H. Hucho, G. Sovran, Aerodynamic of road vehicles, *Ann. Rev. of Fluid Mech.*, Vol. 25, pp. 485-537, 1993
- [2] M. Helfer, M. Riegel, J. Wiedemann, The effect of turbulence on in-cabin wind noise - a comparison of road and wind tunnel results, *Proceeding. 6th MIRA International Conference on Vehicle Aerodynamics*, Gaydon, UK, 2006
- [3] A. R. George, *Automobile aerodynamic noise*, SAE Technical Paper, 900315, 1990
- [4] H. Fastl, E. Zwicker, *Psychoacoustics : facts and models*, Springer, Berlin, 3ème 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 flows 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