

Mesures couplées Pression-Vitesse pour l'analyse du bruit transmis à l'intérieur d'un habitacle automobile

Laurent-Emmanuel Brizzi, Joeffrey Fischer,
Rémi Bessis, Vincent Valeau et Yves Gervais

Pprime

Bât B17 - Campus Sud

6, rue Marcel Doré

86000 Poitiers

France

E-mail : laurent.brizzi@univ-poitiers.fr

Résumé

Afin d'améliorer le confort acoustique à bord des automobiles, il est nécessaire d'étudier les effets de la dynamique tourbillonnaire lié au décollement instationnaire au niveau du montant de baie d'une voiture (Apillar). Pour cela il faut mesurer simultanément le champ hydrodynamique au voisinage de la paroi (Pression, vitesse) ainsi que le champ acoustique à l'intérieur de l'habitacle. Dans le but de développer les outils d'analyse indispensables à la compréhension physique des mécanismes mis en jeu qui contribuent au bruit aérodynamique transmis, nous avons effectué des essais pour une configuration réaliste bien que simplifiée (marche montante).

Des densités spectrales et un traitement de signal à base de corrélation ont été mis en oeuvre pour lier les structures de l'écoulement avec la transmission acoustique.

Des propositions pour la séparation des contributions derrière le vitrage sont aussi présentées.

Le montant de baie, à l'angle du pare-brise et la vitre avant, est parmi les éléments aérodynamiques les plus cruciaux d'une automobile [1]. L'écoulement qui contourne le montant de baie génère une structure cohérente tridimensionnelle intense (tourbillon de montant de baie) qui est une source de fluctuations de pression pariétale sur le vitrage et donc une source de bruit aérodynamique résultant du transfert d'une partie de l'énergie cinétique des structures turbulentes interagissant avec la fenêtre en énergie acoustique.

L'excitation directe (hydrodynamique) de la vitre par l'écoulement à basse fréquence est associée aux structures turbulentes présentes au-dessus de la fenêtre. Cette excitation hautement énergétique contribue aux basses fréquences alors que l'excitation acoustique, prédominante dans les moyennes et hautes fréquences, correspond à des ondes acoustiques en cohérence spatiale avec les modes de vibration de la fenêtre, en particulier lorsqu'on se situe dans le voisinage de la fréquence de coïncidence de la fenêtre.

Une étape clé dans la compréhension des mécanismes impliqués dans la transmission des sons à l'intérieur d'un véhicule est la séparation des contributions hydrodynamiques et acoustiques pour le champ acoustique interne. Il s'agit là d'une tâche compliquée dans le cas présent en raison du mélange d'écoulement turbulent avec des caractéristiques très hétérogènes et un problème complexe de vibro-acoustique.

Les techniques communément utilisées peuvent se classer schématiquement en deux catégories :

- L'une met en oeuvre une analyse spatio-temporelle avec un filtrage dans le domaine fréquence-nombre d'onde. Cette technique a été utilisée avec un succès mitigé, mais est encore couramment appliquée à l'analyse de la pression à la surface. Elle est habituellement basée sur un modèle Corcos ou Chase [2] [3] et elle a par exemple été appliquée à deux des géométries 2D et même des écoulements de montant de baie [4] [5] [6].

- La deuxième stratégie, que nous avons choisie, repose sur des techniques de corrélation en traitement du signal. Des études antérieures ont permis d'étudier les mécanismes hydrodynamiques sur les fluctuations de pression pariétale sur des géométries telles qu'un disque situé à proximité d'une paroi [7], divers écoulements de type marche [8] ou un corps permettant de modéliser le tourbillon de montant de baie (MOPET) [9]. Cependant, très peu de ces études concernaient simultanément la mesure de pression en paroi et le champ acoustique rayonné. Parmi ces études, Leclerc [10] est le seul à avoir étudié les mécanismes de transmission du son à travers une plaque métallique mince sous l'excitation d'une couche limite turbulente.

Dans la présente étude, nous considérons l'écoulement turbulent généré par une marche montante. Cette configuration académique a été retenue car elle présente un bon compromis entre représentativité (écoulement fortement décollé) et simplification (écoulement 2D en moyenne). De plus, ce type de géométrie, déjà étudiée dans le passé, nous permettra d'avoir des données comparatives pour lesquelles les méthodes peuvent être testées.

Procédure expérimentale

Soufflerie anéchoïque EOLE

Les expériences ont été menées dans la soufflerie anéchoïque subsonique de type Eiffel (EOLE) de l'Institut PPrime (Poitiers, France). L'écoulement entre dans la chambre anéchoïque (4 m x 3 m x 3 m) à travers une tuyère convergente de (0,46 m x 0,46 m) et est aspiré à travers un collecteur de (1,2 m x 0,8 m). Des parois latérales servent à raccorder la buse convergente avec le collecteur afin d'améliorer la bidimensionnalité de l'écoulement entre les parois. Dans ces conditions, les essais sont effectués en mode 1/4 ouvert.

Entre les parois latérales, une plaque amovible émerge pour créer une géométrie de type marche montante bidimensionnelle de hauteur $e=30$ mm. Selon les mesures souhaitées, cette paroi est, soit une plaque rigide instrumentée pour les mesures de pression pariétale, soit une plaque rigide avec une mince fenêtre rectangulaire (46 cm x 20 cm) capable de vibrer sous une charge turbulente.

Pour cette dernière configuration, un caisson anéchoïque est placé directement sous la plaque pour permettre des mesures du bruit transmis à travers le vitrage. La cavité a un volume intérieur d'environ $0,35$ m³ et est renforcé sur sa surface externe afin d'assurer une isolation acoustique suffisante concernant le bruit de fond dans la chambre. Le dispositif est illustré à la figure 1.

La vitesse de l'écoulement incident (U_∞) varie entre 30 et 50 m/s (soit 110 à 180 km/h).

Instrumentation

Pour cette étude, les mesures comprenaient :

- Des mesures de pression pariétale : Pour les mesures de pression pariétale des capteurs différentiels déportés ont été utilisées. Pour prendre en compte les effets du système (délais, modes de résonance, etc.), un étalonnage en fréquence a été utilisé pour corriger l'amplitude et la phase des spectres. La fréquence de coupure pour le système est d'environ 1,3 kHz pour une gamme de pression de 1 250 Pa.

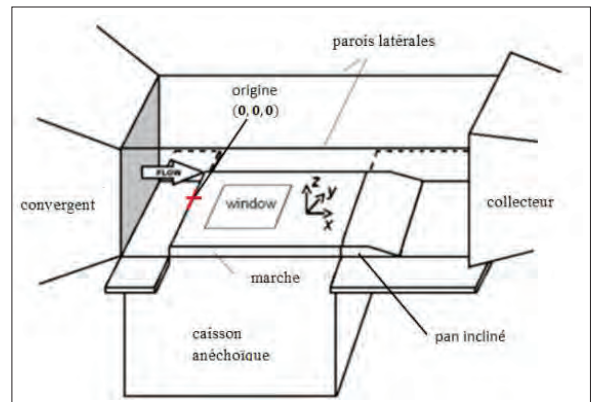
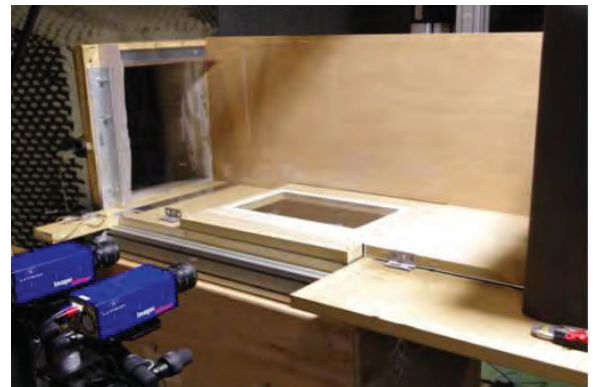


Fig. 1 : Photo et schéma du montage de la marche montante dans la soufflerie

Des visualisations pariétales préliminaires de l'écoulement ont été effectuées afin d'aider à déterminer la position optimale pour les mesures de pression en surface. Au final 63 prises (de 1,3 mm de diamètre) ont été percées sur la plaque, réparties en trois lignes comme suit : 31 prises sur une ligne dans la direction de l'écoulement (L_1), 2 lignes de 16 prises dans le sens transversal pour vérifier la bidimensionnalité de l'écoulement, en amont (L_2) et en aval (L_3) de la ligne moyenne de rattachement. L'espacement minimum entre deux prises est de 5 mm. Pour les mesures, 16 capteurs ont été utilisés pour les acquisitions simultanées. Les signaux amplifiés par les capteurs ont été enregistrés à une fréquence d'échantillonnage de 6 250 Hz par un système d'acquisition multicanaux ETEP.

- Des mesures de vitesse : Les champs de vitesse ont été obtenus par PIV (*Particle Image Velocimetry*). Pour la création du plan lumineux nécessaire à l'éclairage de l'écoulement, nous avons utilisé un LASER Nd-Yag double cavité QUANTEL (2*120 mJ maxi). La cadence maximum de chaque cavité est de 10 Hz. Le faisceau LASER d'une longueur d'onde de 532 nm entre dans la veine d'essais via un système de lentille afin d'obtenir un plan lumineux relativement fin (environ 1,5 mm). L'écoulement est ensemencé en utilisant un générateur de fumée de spectacle (diamètre moyen des particules). Les images sont prises à partir d'une caméra CCD 12 bits LaVision (1 376 pixel x 1 040 pixels) travaillant à une fréquence d'environ 4/5 Hz. Les images sont analysées via le logiciel Davis 7.2 en vue d'obtenir le déplacement des traceurs. Pour ce traitement, nous utilisons une inter-corrélation multi-passes (4 passes, la dernière étant doublée) aboutissant à une taille de fenêtre finale de 16 x 16 avec un taux de recouvrement de 50% x 50%.

Au préalable, et afin de minimiser l'influence de reflets ou autres artefacts, une « image de fond » est soustraite à chaque image avant le calcul des vecteurs. Elle est obtenue avant (ou après) l'enregistrement de la séquence dans les mêmes conditions expérimentales que pour les mesures mais en absence d'ensemencement. Afin d'effectuer un traitement statistique des mesures nous avons, pour chaque configuration, fait l'acquisition de 2 000 champs de vitesse instantanée. À partir des champs instantanés, une validation et un processus statistique sont utilisés pour obtenir les grandeurs moyennes et les valeurs de tension de Reynolds. Les vitesses ont été estimées dans le plan de symétrie vertical moyen et des plans parallèles à la paroi à 2 mm et 5 mm (cf. Figure 2).

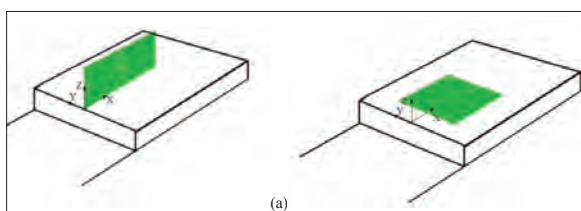


Fig. 2 : PIV set-up : (a) plan de symétrie : (b) les plans parallèles à la surface de la marche (2 mm et 5 mm)

- Des mesures acoustiques : Le bruit à l'intérieur de la cavité, transmis par le biais du vitrage (bruit intérieur), a été mesuré à l'aide de microphones à condensateur Brüel & Kjør (1/2 pouce) connectés à un amplificateur de conditionnement. Les signaux ont été enregistrés à une fréquence de 25 kHz par le système d'acquisition multi-canaux ETEP. Pour les mesures extérieures, nous avons utilisé une antenne microphonique comportant 32 microphones (cf. Fischer [11]).

Résultats

Structure de l'écoulement moyen

L'organisation de l'écoulement sur une marche montante est complexe et dépend fortement des conditions expérimentales et en particulier des caractéristiques de la couche limite amont. Toutefois, des études numériques et expérimentales antérieures ([8], [12]) confirment nos résultats qui mettent en évidence deux zones de l'écoulement particulières (cf. figure 3) :

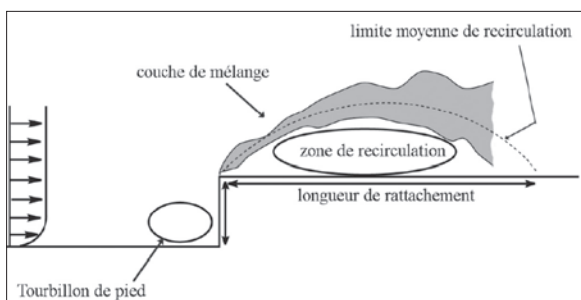


Fig. 3 : Structure générale de l'écoulement de marche montante. D'après Largeau ([12])

- Une recirculation de pied de marche : Le tourbillon de pied de marche mesure entre 0,8 et 1,5e de longueur pour une hauteur comprise entre 0,6 et 0,7e. Il est provoqué par la concentration de la vorticité issue de la couche limite turbulente qui se développe en amont de la marche. Sous certaines conditions expérimentales, la structure de pied de marche peut présenter un caractère tridimensionnel qui est associé à un mécanisme périodique d'éjection au-dessus de la marche (cf. figure 4). Il se forme alors des tourbillons longitudinaux qui interagissent avec l'écoulement en aval du front de la marche.

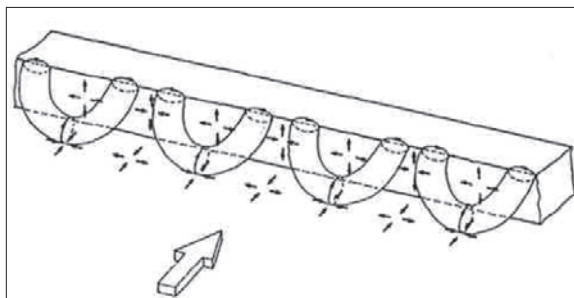


Fig. 4 : Représentation schématique du phénomène d'éjection au niveau de la marche (tourbillons en forme de U). D'après Martinuzzi & Tropea [13]

- Une zone de recirculation en aval du bord de la marche : La bulle de recirculation formée en aval du front de la marche est de dimension plus importante, avec une hauteur de 0,7-0,8e et une longueur (longueur de recollement) 3,2-4,7e. Cette zone de recirculation aval est associée à deux mécanismes instationnaires basse fréquence : un mouvement de battement de la bulle ($St=0,08-0,18$), et un lâ  cher tourbillonnaire périodique depuis le recollement ($St=0,5-1,0$).

La génération du bruit aéroacoustique de la configuration de marche montante est régie par des mécanismes complexes, qui sont à l'heure actuelle encore mal connus. Les rares études théoriques présentes dans la littérature s'intéressent à l'interaction entre un ou plusieurs tourbillons et la marche. Celles-ci sont complétées par des simulations numériques qui confirment le lien entre le rayonnement acoustique et le phénomène de lâ  cher tourbillonnaire et permettent d'obtenir un rayonnement acoustique dipolaire, orienté vers l'amont et l'aval du bord de la marche. Expérimentalement, on montre que ces sources aéroacoustiques ont une signature en moyenne fréquence, entre 400-1 000 Hz et 2,5-10 kHz, selon l'auteur et la vitesse de l'écoulement considérée. Par ailleurs, certaines études permettent de localiser les sources acoustiques au niveau de la couche de cisaillement, dans la partie supérieure de la bulle de recirculation, et au niveau du tourbillon de pied de marche.

L'étude des statistiques de vitesse et de pression pariétale met en évidence le décollement et le recollement de l'écoulement, avec la formation d'une bulle de recirculation en aval du front de la marche (cf. Figure 5, page suivante). Cette structure est caractérisée par une longueur de recollement LR comprise entre 3,7e et 4,3e (pour une vitesse de 30 à 50 m/s), et une hauteur de recollement $HR \approx 0,5e$.

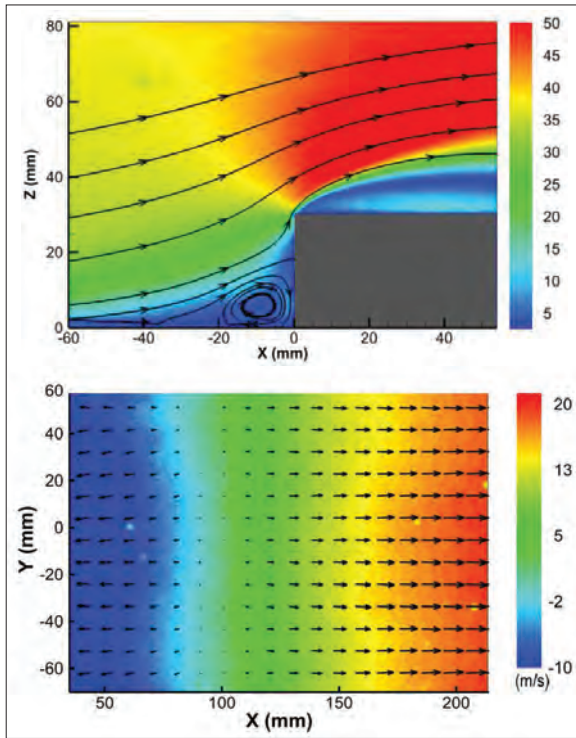


Fig. 5 : Vitesse moyenne dans le plan de symétrie et dans le plan $Z=2$ mm ($U_\infty=40$ m/s)

Le second décollement se situe au niveau du pied de la marche. La bulle de recirculation qui s’y forme est de dimension plus modeste, avec une longueur de $1,2e$ et une hauteur de $0,6e$. Bien que le tourbillon de pied de marche soit situé en amont de la vitre et donc en dehors de la zone d’étude principale, l’influence de cette structure sur l’écoulement en aval du front est très importante. Les résultats permettent également de vérifier le caractère bidimensionnel de l’écoulement moyen. On montre grâce aux statistiques de vitesse et de pression pariétale le caractère fortement bidimensionnel du décollement sur une zone $Y=\pm 100$ mm, à l’emplacement de la vitre dans l’écoulement.

Pression pariétale

La structure instationnaire de l’écoulement de marche montante peut être aussi décrite à partir de l’analyse du contenu fréquentiel des données de pression pariétale (cf. figure 6). En particulier, l’analyse des DSP permet d’identifier la signature fréquentielle ($St=0,65$) associée au lâcher tourbillonnaire de structures cohérentes et très énergétiques dans l’écoulement proche paroi. On note également une signature de caractéristique large bande en très basse fréquence ($St\approx 0,1$), qui pourrait correspondre à un mouvement de battement de la zone décollée. Toutefois, les mesures fortement bruitées dans ce domaine de fréquences ne permettent pas de l’affirmer avec certitude.

Les observations réalisées à partir des spectres de pression sont confirmées par l’étude des cohérences entre capteurs qui mettent en évidence les signatures communes aux signaux de pression pariétale (cf. figure 7), c’est-à-dire issues d’un même phénomène.

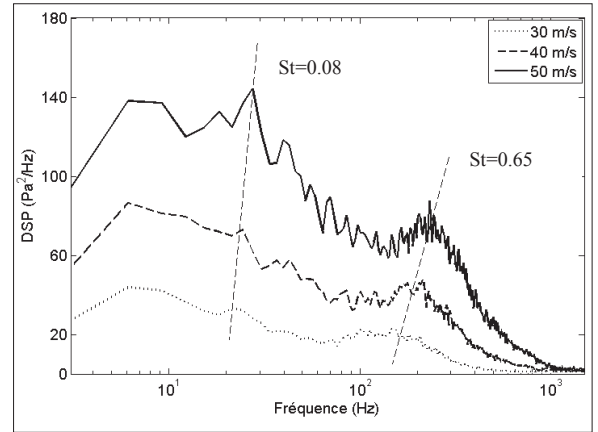


Fig. 6 : Évolution de la DSP au niveau du recollement moyen ($X/L_R=1$) en fonction de la vitesse de l’écoulement

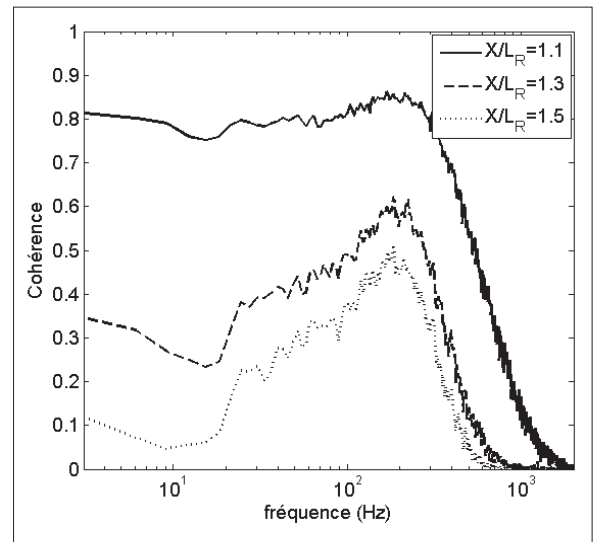


Fig.7 : Cohérence des signaux de pression pariétale au niveau du recollement moyen

L’analyse de ces grandeurs fournit donc des renseignements sur l’organisation de l’écoulement et son développement et confirme la signature du lâcher tourbillonnaire à $St=0,65$ et celle du battement à $St\approx 0,1$.

La mesure des phases associées aux cohérences en aval du recollement apportent des informations sur la dynamique fine du lâcher tourbillonnaire. En particulier, on peut estimer la vitesse de convection des structures dans l’écoulement proche paroi ($U_c=0,6 U_\infty$) similaire à la vitesse caractéristique d’un écoulement de couche limite turbulente. Ce sont donc des phénomènes de nature purement aérodynamique qui sont mis en évidence à travers l’étude des pressions pariétales.

En effet, à partir de ces mesures, il est très difficile de mettre en évidence une signature de nature acoustique (caractérisée par une vitesse acoustique $c_0=340$ m/s) à partir de l’étude du champ de pression pariétale.

Bruit généré par l'écoulement de marche montante

L'analyse dans le domaine des moyennes et hautes fréquences des données de pression acoustique a permis de dégager les caractéristiques d'un bruit lié à la marche montante dans le champ lointain. Les DSP et les cohérences acoustiques mettent en évidence un bruit large bande, compris approximativement entre 500 Hz et 3-4 kHz (cf. figure 8), selon la vitesse et consistantes avec la littérature (Beker [14], Largeau [8] et Leclercq [10]).

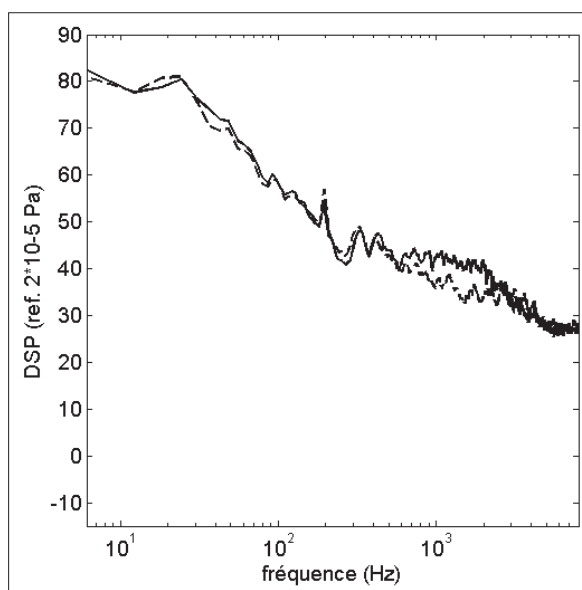


Fig. 8 : Comparaison entre spectres DSP du bruit généré par l'écoulement de marche montante et par une couche limite turbulente non décollée (CLT), en champ lointain (E₁)

À partir de mesure d'antennerie microphonique (Fischer [11]) il est possible de visualiser en fonction de la bande de fréquence l'origine moyenne de la source de bruit. Sur la figure 9 on observe clairement que l'origine du bruit se situe au niveau du bord de la marche. Cette localisation est à rapprocher aux mécanismes instationnaires d'éjection tourbillonnaire mis en évidence précédemment (cf. figure 4).

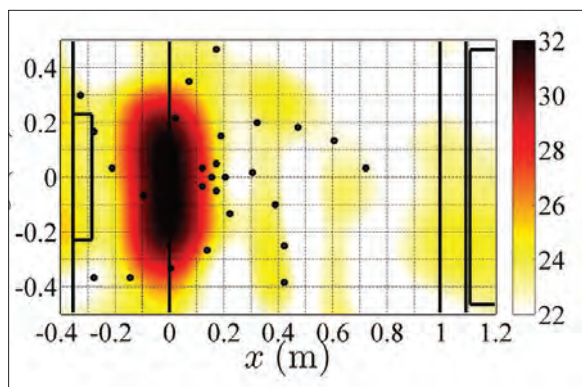


Fig. 9 : Cartographies de FV moyenne sur la marche montante en écoulement pour 40 m/s à $f = 2$ kHz. Niveau en dB, référence = 2×10^{-5} Pa

On identifie également cette signature aérodynamique dans le bruit transmis à travers la vitre (cf. Figure 10), entre 500 Hz et 3-5 kHz, selon la vitre utilisée. On explique ces différences par un effet de transparence lié à la coïncidence acoustique. Les DSP acoustiques sont dominées dans les basses fréquences (en-dessous de 200 Hz) par le bruit de fond de la soufflerie. Cependant l'étude des cohérences entre pression acoustique et pression pariétale (en aval de la vitre) permet toutefois de se défaire en partie de ces perturbations, permettant ainsi de mettre en évidence la contribution basse fréquence du lâcher tourbillonnaire dans les mesures acoustiques.

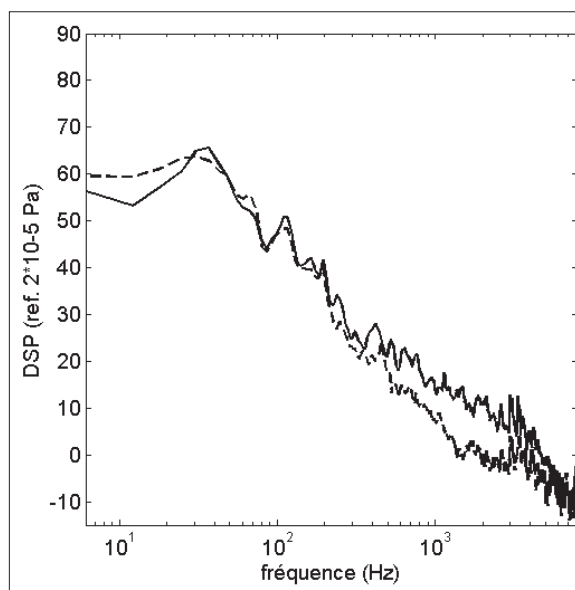


Fig. 10 : Comparaison entre les spectres DSP du bruit généré par l'écoulement de marche montante et par une couche limite turbulente non décollée (CLT) derrière la vitre en verre de 3 mm d'épaisseur (I₁)

Analyse des liens pression-vitesse

Les corrélations calculées à partir des données couplées de vitesse et de pression pariétale (cf. figure 11) montrent un mécanisme d'excitation en paroi de nature purement hydrodynamique. À partir de l'analyse des corrélations dans le plan de symétrie de la veine d'essai, il est possible, à partir d'un modèle simple de convection de tourbillon, d'identifier et d'expliquer la signature des structures aérodynamiques associées au phénomène périodique de lâcher tourbillonnaire. L'étude de l'évolution temporelle des corrélations permet en outre de calculer une vitesse de convection de ces structures dans la couche de mélange ($U_c \approx 0.5 \times U_\infty$).

Les corrélations sont également appliquées aux mesures couplées vitesse-pression acoustique. Les résultats obtenus permettent d'émettre l'hypothèse de sources acoustiques localisées à l'intérieur de la bulle de recirculation en aval du front de la marche. Toutefois, les corrélations sont très bruitées (~5% à 10%), ce que nous interprétons comme étant la conséquence directe du caractère tridimensionnel des structures instationnaires formées en aval du front de la marche montante. Cette conclusion est en partie motivée par les résultats des corrélations vitesse-pression pariétale calculées dans un plan parallèle à la paroi.

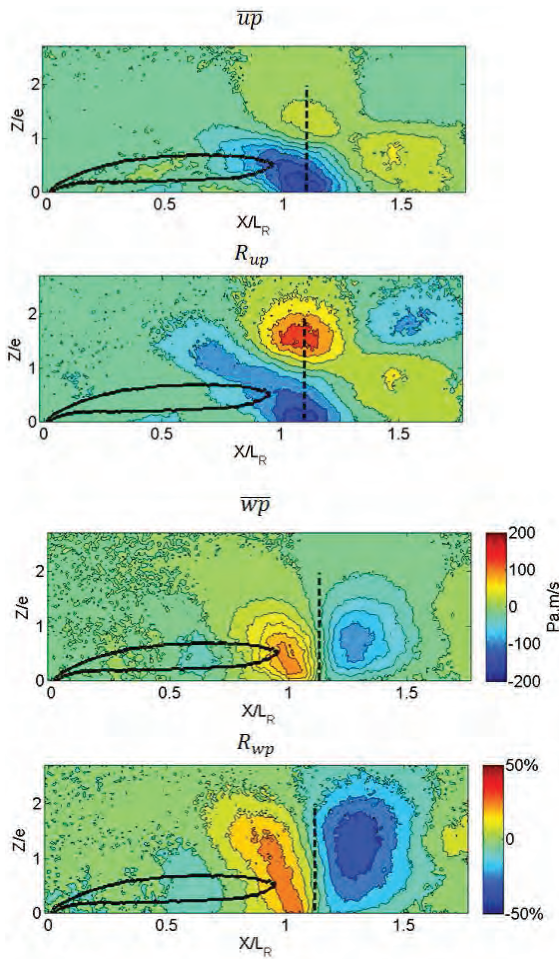


Fig. 11 : Corrélations dans le plan de symétrie $Y=0$ obtenues pour la position de capteur $X/L_R=1,2$

Leur analyse fait apparaître des structures relativement décorréliées selon l'envergure de la marche. La présence d'effets tridimensionnels en aval du front est vraisemblablement liée à une interaction entre la structure de pied de marche et le décollement. Il se produit en effet un phénomène d'éjection périodique de filets fluides localisé au niveau du tourbillon de pied, qui peut être observé grâce aux champs de vitesse instantanés.

Dans le cas où les cohérences sont calculées à partir des pressions acoustiques intérieures (cf. figure 12), on ne relève au contraire pas de contribution dominante. Ce constat met en évidence la nécessité de la prise en compte du comportement vibroacoustique de la vitre pour l'étude du bruit transmis.

Conclusion

L'étude de la structure de l'écoulement de marche montante nous a permis de mieux comprendre les différents mécanismes aérodynamiques qui contribuent au champ d'excitation à la surface de la vitre. Cet écoulement est caractérisé par d'importantes fluctuations de vitesse et de pression, qui sont associées à des mécanismes d'excitation stationnaires très énergétiques. Du bord de la marche jusqu'à la position du recollement moyen, l'interaction entre l'écoulement et la paroi est marquée par le lâcher tourbillonnaire de la bulle de recirculation et le lâcher tourbillonnaire. En aval du recollement, l'interaction n'est plus dominée que par le lâcher tourbillonnaire. Ces phénomènes contribuent dans une large mesure aux fluctuations de pression relevées en paroi, comme le montre l'analyse du contenu fréquentiel de ces données.

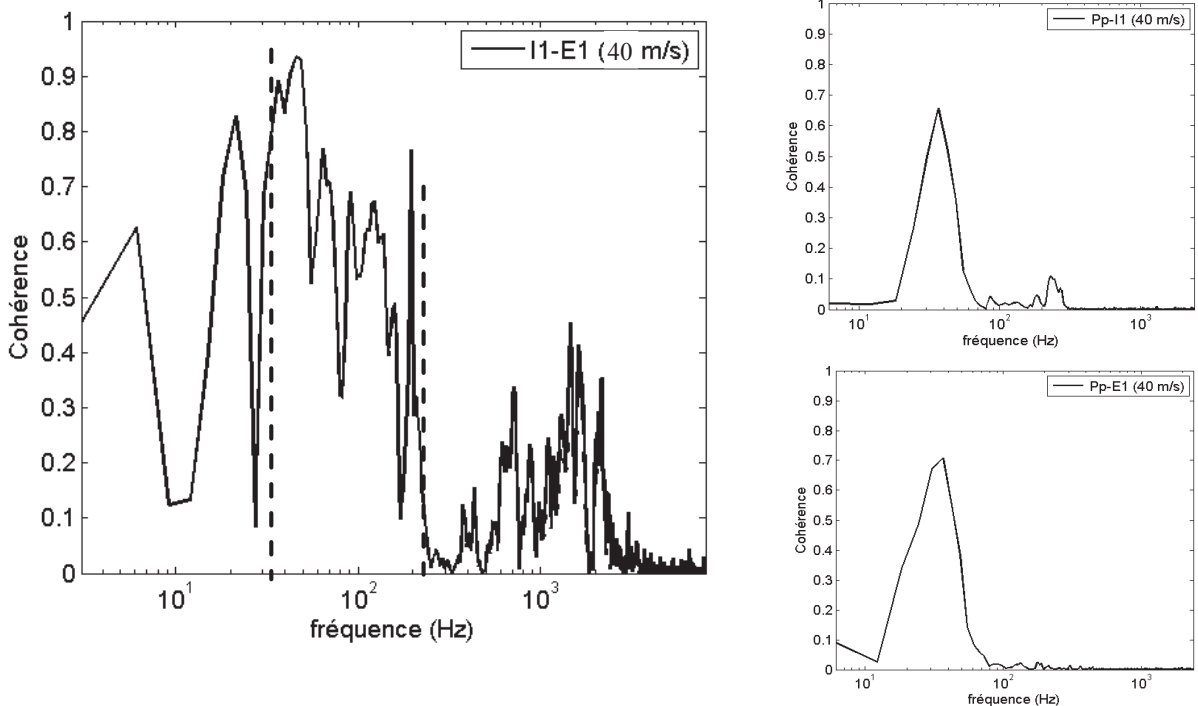


Fig. 12 : Évolution des cohérences acoustiques entre pression pariétale (P_p) et pression acoustique intérieure (I_1) et extérieure (E_1)

À partir de là, on a cherché à relier les structures cohérentes de l'écoulement aux mesures de pression acoustique en champ lointain et derrière la vitre. En effet, l'analyse fréquentielle de ces données permet d'identifier très nettement une contribution liée à la marche montante.

Dans un premier temps, les corrélations entre les fluctuations de vitesse et la pression pariétale ont confirmé le rôle prépondérant du lâcher tourbillonnaire dans l'excitation de la vitre. Les cohérences calculées entre la pression pariétale (en amont de la vitre) et la pression acoustique permettent de confirmer la contribution de ce phénomène aérodynamique au bruit transmis à travers la vitre. En raison du bruit de fond important lié à la soufflerie, cette source de bruit essentiellement située dans les basses fréquences ($St=0,65$), n'a cependant pas pu être directement identifiée dans le bruit transmis.

Dans un second temps, l'étude des données couplées de vitesse et de pression acoustique a permis de confirmer l'existence d'un lien entre les fluctuations acoustiques en champ lointain et les fluctuations de l'écoulement (de vitesse et de pression). Les corrélations obtenues suggèrent la présence de sources acoustiques dans la bulle de recirculation formée en aval du front de la marche. On peut supposer que ces sources sont associées aux émergences dans le domaine des moyennes fréquences (>500 Hz) relevées au cours de l'étude acoustique. Celles-ci contribuent très certainement au bruit transmis à travers la vitre. Toutefois, les corrélations calculées avec la pression intérieure ne permettent pas de retrouver cette localisation des sources dans l'écoulement. Ce résultat est vraisemblablement lié à une perte de l'information spatiale au passage de la vitre.

[9] C. Hoarau, J. Borée, J. Laumonier, Y. Gervais, Unsteady wall pressure field of a model A-pillar conical vortex, *Int. J. Heat and Fluid Flow* 29, pp 812-819, 2008

[10] D. Leclercq, Modélisation de la réponse vibroacoustique d'une structure couplée à une cavité en présence d'un écoulement turbulent, PhD., Université de Technologie de Compiègne, 1999

[11] J. Fischer, Identification de sources aéroacoustiques au voisinage de corps non profilés par formation de voies stationnaire et instationnaire", PhD., Université de Poitiers, 2014

[12] M. Kiya, K. Sasaki, Structure of a turbulent separation bubble, *J Fluid Mech.* 137, pp 83-113, 1983

[13] Martinuzzi, R., Tropea, C., The Flow Around Surface-Mounted, Prismatic Obstacles Placed in a Fully Developed Channel Flow, *J. Fluids Eng.*, Vol. 115, pp 85-92, 1993

[14] Becker, S., Escobar, M., Hahn, C., Ali, I., Kaltenbacher, M., Basel, B., Grünwald, M., Experimental and Numerical Investigation of the Flow Induced Noise from a Forward Facing Step, AIAA/CEAS Conference, 23-25 May 2005

Remerciements

Les auteurs remercient chaleureusement Laurent Philippon, Janick Laumonier, Pascal Biais et Pascal Braud pour leur soutien technique. La thèse de Rémi Bessis est cofinancée par le CNRS (France) et PSA Peugeot Citroën et Renault, dans le cadre du CNRT «Aérodynamique et Aéroacoustique des véhicules terrestres ».

Références bibliographique

[1] W.H. Hucho, Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering, SAE, ISBN, 1998

[2] G.M. Corcos, Resolution of pressure in turbulence, *J. Acoust. Soc. Am.*, 35, pp 192-199, 1963

[3] D.M. Chase, The character of the turbulent wall pressure spectrum at subconvective wavenumbers and a suggested comprehensive model, *J. Sound Vib.*, 112, pp 125-147, 1987

[4] B. Arguillat, D. Ricot, C. Bailly, G. Robert, Measured wavenumber : Frequency spectrum associated with acoustic and aerodynamic wall pressure fluctuations, *J. Acoust. Soc. Am.*, 128, pp 1647-1655, 2010

[5] S. Debert, M. Pachebat, V. Valeau, Y. Gervais, Ensemble-Empirical-Mode-Decomposition method for instantaneous spatial-multi-scale decomposition of wallpressure fluctuations under a turbulent flow, *Exp. Fluids*, 50, pp 339-350, 2011

[6] S. Vergne, F. Van Herpe, J. Viot, Spatio-temporal analysis of wall pressure fluctuations on several automotive side-glasses, *International Journal of Aerodynamics*, 1(3-4), pp 354-372, 2011

[7] T. Ruiz, C. Sicot, L.E. Brizzi, J. Borée, Y. Gervais, Pressure/velocity coupling induced by a near wall wake, *Exp. Fluids* 49(1), pp 147-165, 2010

[8] J.F. Largeau, Analyse expérimentale de la dynamique et du rayonnement acoustique d'un écoulement de marche montante, PhD., Université de Poitiers, 2004