CFA/VISHNO 2016

Sifflement Aérodynamique d'un Rétroviseur

H. Lazure^a, V. Morinière^b, J. Laumonier^b et L. Philippon^b ^aPSA Peugeot Citroen, ENSIP / Institut Pprime - Bâtiment E7, 6 rue Marcel Doré - TSA 41105, 86073 Poitiers Cedex 9, France ^bInstitut Pprime, CNRS - Université de Poitiers - ENSMA - UPR 3346, ENSIP bâtiment B17 - 6 rue Marcel Doré - TSA 41105, 86073 Poitiers Cedex 9, France herve.lazure@mpsa.com



Dans un véhicule automobile, l'apparition de sifflements d'origine aérodynamique constitue un défaut et cette émergence, même de niveau faible par rapport au bruit ambiant, est aisément détectée et fortement critiquée. Ainsi, les champs aérodynamiques de l'écoulement autour du rétroviseur et son rayonnement acoustique sont étudiés afin de dégager des solutions efficaces (par modification de forme géométrique) pour éliminer ce problème. Dans le cadre de l'OpenLab Fluidics@Poitiers, nous avons testé deux formes de rétroviseurs à échelle un, montés sur un support, dans la soufflerie BETI de l'institut PPRIME. L'apparition du sifflement, à certaines conditions de vitesse de vent et de dérapage, sont conformes aux observations sur un véhicule complet.

Nous présenterons les moyens d'essais expérimentaux d'étude du sifflement du rétroviseur, et les résultats de l'étude paramétrique sur les conditions d'apparition du phénomène et sa caractérisation. Des mesures aérodynamiques instationnaires (HWA) couplées à des mesures acoustiques ont permis de détecter des détachements tourbillonnaires localisés au-dessus et en aval du rétroviseur. Des visualisations des tensions pariétales permettent aussi de caractériser le phénomène et détecter les zones sources. Enfin, nous proposons une comparaison avec des résultats bibliographiques (profils d'aile) pour apporter notre contribution à la compréhension des phénomènes.

1 Introduction

L'apparition de sifflements, notamment d'origine aérodynamique, perçu par les passagers d'un véhicule est souvent fortement gênante et justement critiquée. Il peut apparaître dans différentes situations de vitesse, en fonction des conditions climatiques ou de l'environnement qu'il est difficile d'identifier. Pour le rétroviseur, ce sifflement est relativement aigu et donc très rapidement perçu par les passagers.

En aérodynamique, la stabilisation et la laminarisation de l'écoulement autour du véhicule, recherchées depuis plusieurs années pour des gains de pénétration dans l'air et donc de consommation énergétique, peuvent favoriser l'apparition de sifflements de toutes sortes liés à la présence d'antenne, de passage d'aspérité, de cavité... Certains sont aujourd'hui bien compris, d'autres, comme le sifflement de rétroviseur, restent à comprendre pour en déduire des méthodes de suppression ou a minima être en mesure d'évaluer rapidement le risque d'apparition.

Pour s'affranchir des contraintes de jeux, d'affleurement, de conformités des différentes pièces constitutives des rétroviseurs, cette étude a été menée sur deux maquettes monoblocs de rétroviseurs, fixées sur un support profilé. Les essais ont été menés dans la soufflerie anéchoïque BETI de l'institut PPRIME à Poitiers.

Cette présentation se compose de quatre parties : la première partie présente les moyens d'essais expérimentaux d'étude du sifflement de rétroviseur. La deuxième partie regroupe les mesures acoustiques de caractérisation des sifflements en fonction des paramètres géométriques et aérodynamiques. La partie suivante propose une méthode de détection des zones de l'écoulement à l'origine des sifflements par étude de cohérence entre la vitesse turbulente et le bruit émis. Enfin, la conclusion et les perspectives termineront cette présentation.

2 Moyens d'essais

2.1 Soufflerie anéchoïque BETI

Mise en service à l'occasion de ces premiers essais dans le cadre de l'OpenLab Fluidics@Poitiers, la soufflerie anéchoïque BETI (Bruit Transport Environnement et Ingénierie) est située dans les locaux de l'Ecole Nationale Supérieure des Ingénieurs de Poitiers (ENSIP). Ses principales caractéristiques sont les suivantes :

- Veine libre : 0,7 m x 0,7 m
- Rapport de contraction : 10

- Vitesse nominale : 60 m/s (216 km/h)
- Volume de la cellule d'essais : 90 m3
- Ventilateur centrifuge d'une puissance : 75 kW
- Conditions de champ libre pour f > 200Hz



Figure 1 : Rétroviseur sur son support placé dans BETI et positions des microphones champ lointain

Pour cette étude, la veine d'essais a été utilisée en configuration ³/₄ ouverte (Figure 1)

2.2 Maquettes de rétroviseur

Les maquettes de rétroviseur sont placées sur un support profilé perturbant le moins possible l'écoulement. On notera que ce support a été validé dans deux autres campagnes de mesure en soufflerie 2/5ème à S2A (Souffleries Aéroacoustiques Automobile, à St-Cyr l'Ecole). Deux formes de boitier sont étudiées (Figure 2).



Figure 2: Rétroviseurs sur leur support : (a) avec carre aérodynamique en partie supérieure, (b) sans.

Seule une « carre aérodynamique » placée sur la coque supérieure du rétroviseur différencie les deux boitiers. Le boitier avec cette excroissance est dénommé « rétro(a) » l'autre étant appelé « rétro(b) ». Une configuration sans boitier, correspondant au support monté du pied seul est aussi testée pour s'assurer que les émergences étudiées ne proviennent pas des conditions de montage.



Figure 3 : Angle de dérapage du montage

L'ensemble support/rétroviseur a été installé sur le plan inférieur de la veine d'essais offrant la possibilité de régler l'angle d'incidence du montage (dérapage) par rapport à l'écoulement principal (Figure 3). Cette situation simule les effets d'un vent latéral sur le véhicule en progression.

2.3. Moyens de mesures acoustiques et aérodynamiques

Pour les mesures du rayonnement acoustique, quatre microphones ont été installés hors du flux et à environ un mètre du rétroviseur (Figure 1).

Les mesures de vitesse de l'écoulement ont été réalisées par Anémométrie à fil chaud 1D à des fréquences jusqu'à 20 kHz. La sonde est montée sur un bras profilé associé à un système de déplacement 3 axes, piloté depuis la salle de commande de BETI.

Quelques mesures de champ de vitesse ont aussi été réalisées par PIV résolues en temps, à une fréquence d'échantillonnage de 20 kHz.

Pour cette présentation, seules les mesures les plus pertinentes (microphones 1 et 4) sont évoquées. L'analyse du bruit de fond sous un écoulement à 34 m/s permet de conclure qu'à des fréquences supérieures à 400 Hz, le niveau acoustique généré par le rétroviseur émerge largement du bruit de fond (Figure 4).



Figure 4 : Densité spectrale de puissance acoustique avec rétroviseur comparé au bruit de fond ($U_0 = 34 \text{ m/s}$)

Ces résultats de mesure de bruit de fond vont donc nous permettre d'identifier sans perturbation les phénomènes de sifflement recherchés. Il est aussi intéressant de constater que les faibles niveaux acoustiques du bruit de fond dans la soufflerie BETI offriront des conditions d'études idéales même sur des configurations aéroacoustiques plus large bande.

3 Analyse du champ acoustique lointain avec maquette de rétroviseur

Pour illustrer le sifflement aérodynamique, nous présentons les spectres acoustiques mesurés au-dessus (micro 4) des deux géométries de rétroviseur sous un écoulement de 25 m/s sans et avec un fort angle de dérapage (Figure 5)





Figure 5 : Niveaux acoustiques des rétroviseurs à 25m/s pour des incidences de 0° et 15°

Quelle que soit l'incidence et la vitesse de l'écoulement, le bruit des rétroviseurs émerge nettement du bruit de fond de la soufflerie, et le montage avec seulement le support et le pied permet de mettre en évidence le bruit généré au passage des coques de rétroviseurs. Le montage des rétroviseurs est ainsi validé dans les bandes de fréquences supérieures à 1 kHz, et l'origine des sifflements est directement associée à la présence du rétroviseur. On notera aussi que sans incidence, le rétro(b) présente une émergence importante autour de 2500 Hz à 25m/s. Ce sifflement est supprimé avec le rétro(a) présentant la « carre aérodynamique ». Par contre, pour les deux géométries, en forte incidence (α =15°) nous observons des émergences sonores encore plus importantes.

Les sonagrammes en fonction de la fréquence (ordonnées) et de la vitesse de l'écoulement (abscisses) sont analysés (Figure 6 et Figure 7). Nous observons un comportement général classique de l'aéroacoustique, à savoir que le niveau global de l'émission acoustique augmente fortement avec la vitesse de l'écoulement. On remarque aussi, sur plusieurs configurations, une structure en forme d'échelle de forte intensité, traduisant les émergences de sifflement dans le rayonnement acoustique des configurations étudiées. Ces observations sont à rapprocher des caractéristiques des sifflements de profils d'aile, observés par Tam & Ju [1] ou Plogmann & al [2,3] lorsque ceux-ci sont en incidence.



Figure 6 : Sonagrammes Rétro(a) suivant quatre incidences : $\alpha = 15^{\circ}$, 10°, 5° et 0°



Figure 7 : Sonagrammes Rétro(b) suivant quatre incidences : $\alpha = 15^{\circ}$, 10°, 5° et 0°

L'apparition des sifflements est fortement dépendante de l'angle d'incidence et des paramètres géométriques de la maquette. En effet, les fréquences principales des sifflements sont en adéquation avec la loi empirique de Paterson & al [4] relative au bruit tonal de profil d'aile (Figure 8) et les pics de sifflement secondaires sont proportionnels à la vitesse de l'écoulement suivant la loi en $U_0^{0,8}$ mise en évidence par Arbey & Bataille [5] (Figure 9). On montre ainsi qu'il existe un lien entre une longueur géométrique du rétroviseur (son épaisseur latérale) et la fréquence principale du sifflement.



Figure 8 : Fréquences des pics dominants en fonction de la vitesse de l'écoulement (toutes configurations)

Comme pour le sifflement de profils d'aile, on remarque aussi qu'il apparait des « sauts » du nombre de Strouhal (en particulier pour le rétro(a) à une incidence de 15° , autour de 30 m/s) ce qui conforte le parallèle que nous réalisons entre ces rétroviseurs et le profil d'aile.



Figure 9 : Fréquences des pics du sifflement pour le rétro(a) en angle d'incidence $\alpha = 15^{\circ}$

En se rappelant que l'objectif majeur est de comprendre les mécanismes d'apparition du sifflement il convient d'étudier la configuration présentant le sifflement le plus important. Nous retenons donc les configurations avec un angle d'incidence α =15° et des vitesses d'écoulement U₀ de 26 et 34 m/s, pour les deux géométries.

4 Caractérisation aéroacoustique du sifflement du rétroviseur

Les conditions d'apparition du sifflement du rétroviseur (vitesse d'écoulement, positionnement de la maquette du rétroviseur) étant déterminées, la seconde phase de l'étude consiste à rechercher les phénomènes présents dans l'écoulement et susceptibles d'être à l'origine du sifflement. Une exploration du champ aérodynamique a donc été réalisée par anémométrie fil chaud 1D dans le voisinage proche de la maquette du rétroviseur.

Peu de publications spécifiquement sur le sifflement de rétroviseurs sont disponibles dans la littérature, néanmoins on peut citer les travaux de Ono & al [6] qui ont analysé ce problème à l'aide de visualisations et de mesures des fluctuations de pression autour d'un rétroviseur sous un écoulement à 30 m/s, avec un angle de dérapage de 10°. La topologie de l'écoulement montre l'existence d'un détachement tourbillonnaire et de lignes de décollement sur le rétroviseur auxquelles sont associées de forts niveaux de fluctuations de la pression pariétale. Dolek & al [7] ont réalisés des mesures de fluctuations de pression à 42 m/s et ont montré l'existence d'un point de décollement sur l'extérieur du rétroviseur et comment le changement de

courbure de la géométrie conduit à de forts niveaux de fluctuations. Les tourbillons sont très influencés par ces effets de décollement principalement à l'angle extérieur du rétroviseur, ce qui conduit à une amplification sélective de modes naturels dans la couche de cisaillement naissante au décollement et produit ainsi des modes harmoniques à hautes fréquences.

4.1 Aérodynamique de l'écoulement

Huit profils de vitesses ont été réalisés aux positions indiquées sur la Figure 10: 6 profils suivant la direction verticale z (profils 1, 2, 3, 6, 7 et 8) et 2 profils suivant la direction transverse y (profils 4 et 5). Le fil chaud est positionné à 5 mm en aval du rétroviseur.



Figure 10 : Positions des profils de vitesses mesurés par anémométrie fil chaud

4.2 Champ aérodynamique moyen

Les profils de vitesses et d'intensités turbulentes mesurés autour du rétroviseur (non présentés dans cet article) montrent des profils classiques. Le champ aérodynamique moyen présente des accélérations au passage du rétroviseur avec une vitesse moyenne légèrement supérieure sur les côtés des rétroviseurs à celle sur leurs faces supérieures et inférieures. Les maxima de turbulence se situent au niveau du bord de fuite du rétroviseur sur les parties inférieure et proche de la face interne du miroir du rétroviseur pour les profils 3 et 6.

4.3 Analyse spectrale de la turbulence en aval du bord de fuite du rétroviseur

L'analyse spectrale de la turbulence aux positions des maxima d'intensité de turbulence mesurés autour du rétroviseur, soit les profils (position 8: Y=-149 mm; Z=24 mm et position 3: Y=-19 mm et Z=-99 mm) montre une parfaite correspondance entre les pics de turbulence et le bruit mesuré en champ lointain avec le microphone 4 situé au-dessus du rétroviseur pour la position 3 (Figure 11).



Figure 11 : Spectres acoustique et de turbulence pour le rétro(a) ($U_0=26$ m/s).

Le spectre de turbulence, à la position 8, montre un spectre large bande, caractéristique d'un écoulement turbulent. Cette analyse montre donc la présence d'un détachement tourbillonnaire en aval du bord de fuite du rétroviseur sur la partie inférieure de la géométrie impliquée dans la génération du sifflement.

Une analyse systématique de la relation existant entre le signal de turbulence à chaque position de mesure et le signal acoustique du microphone 4 est alors menée afin de déterminer les principales régions de l'écoulement à l'origine des sifflements.

4.4 Méthode d'analyse causale du phénomène de sifflement par mesure de cohérence

Le calcul de la cohérence entre les signaux de turbulence et le signal acoustique mesuré en champ lointain (micro 4) permet de déterminer une éventuelle signature fréquentielle commune entre les structures présentes dans l'écoulement et le sifflement, c'est à dire s'ils sont issus du même phénomène.

Soient $Sv_{AA}(f)$, $Sp_{BB}(f)$ respectivement les auto-spectres des fluctuations vitesses au point A et de la pression acoustique au point B et $Svp_{AB}(f)$ l'interspectre entre les deux grandeurs. On définit alors la cohérence $\gamma^2_{A,B}(f)$ entre les fluctuations de vitesses au point A et la pression acoustique au point B comme :

$$\gamma_{A,B}^{2}(f) = \frac{|Svp_{AB}(f)|^{2}}{|Svv_{AA}(f)||Spp_{B}(f)|}$$

Cette analyse réalisée pour les deux vitesses 26 m/s et 34 m/s et pour les deux rétroviseurs a montré un comportement différent dépendant de la géométrie.

Sifflement du rétroviseur (a)

La cohérence entre les deux signaux (vitesse turbulente et pression acoustique) montre que seul le second pic du sifflement présente un lien fort avec la région de l'écoulement située au bord de fuite dans les régions latérale extérieure et supérieure (profils 3 à 6) du rétro(a) (Figure 12) alors que le premier pic en fréquence du signal acoustique semble lié seulement au profil 2 dans la région inférieure (Figure 13).



Figure 12 : Spectre acoustique (courbe noire) et cohérence $\gamma_{A,B}$ sur profil vertical 3 (rétro(a), α =15° et U₀=34 m/s)

Nous pouvons alors supposer que la génération du premier pic du sifflement (environ 2 kHz) est due à la région située dans la partie inférieure du rétroviseur, plus difficile à détecter car la zone est de taille plus petite. Rappelons ici que les deux pics en fréquence du champ acoustique lointain sont d'amplitudes sensiblement équivalentes.



Figure 13: Spectre acoustique (courbe noire) et cohérence $\gamma_{A,B}$ sur profil vertical 2 (rétro(a), α =15° et U₀=34 m/s)

Sifflement du rétroviseur (b)

Les deux pics fréquentiels observés sur les spectres acoustiques en champ lointain sont associés à deux régions de l'écoulement distinctes. La cohérence entre les deux signaux (vitesse turbulente et pression acoustique) est plus importante pour le deuxième pic du sifflement notamment avec le signal des profils 5, 6 et 7 (Figure 14), et aussi avec le profil 3 mais de façon moins importante, pour des vitesses d'écoulement de 26 et 34 m/s. Il semblerait que la région située sur la face latérale du rétroviseur ait une épaisseur plus petite et donc difficilement détectable.



Figure 14: Spectre acoustique (courbe noire) et cohérence $\gamma_{A,B}$ sur profil vertical 6 (rétro(b), α =15° et U=34 m/s)

Comme pour le rétro(a), les cohérences aéroacoustiques sont plus importantes dans les zones d'inspection du fil chaud situées dans la partie inférieure du rétro(b), pour les pics de fréquences plus faibles (Figure 15).



Figure 15: Spectre acoustique (courbe noire) et cohérence $\gamma_{A,B}$ sur profil vertical 2 (rétro(b), α =15° et U₀=34 m/s)

Ainsi, ces résultats montrent que le premier pic en fréquence du signal acoustique est lié en partie au détachement tourbillonnaire situé proche du bord de fuite dans les régions inférieure et latérale du rétroviseur (profils 2 et 3) et que le second pic est fortement lié au détachement tourbillonnaire proche du bord de fuite dans la région supérieure. La région latérale proche du rétroviseur apporte une contribution mais moins importante. Notons que le premier pic en fréquence présente un niveau sonore plus faible que le second.

En résumé

Nous distinguons donc deux topologies d'écoulement suivant la géométrie du rétroviseur (Figure 16). La « carre aérodynamique », présente sur le rétro(a) supprime le détachement tourbillonnaire sur la partie supérieure du rétroviseur, mais renforce le phénomène sur le côté.



Figure 16 : Schéma de la topologie des zones de séparation le long des géométries de rétroviseur

Rappelons que chacun des pics des sifflements observés sur les 2 rétroviseurs est lié à une des 2 régions de l'écoulement en particulier. Quelle que soit la vitesse d'écoulement et la géométrie, en forte incidence (α =15°), ces zones sources ont été localisées à l'extérieur du rétroviseur, à l'opposé de la zone du pied.

En comparaison avec les travaux de la littérature relatifs au bruit tonal des profils d'aile en incidence, nous observons un comportement similaire dans la génération du sifflement. En effet, Plogmann & al [2] ont montré que la principale région source se trouve sur l'intrados du profil d'aile en incidence et que la région de l'extrados est beaucoup moins impliquée. En effet, pour un angle d'incidence, une séparation de l'écoulement apparaît créant une bulle de séparation de bord de fuite ou une séparation ouverte. Les pics discrets en fréquence peuvent être attribués à la présence d'une couche limite laminaire sur l'intrados du profil. Au voisinage du bord de fuite, la couche limite laminaire semble se séparer pour des angles d'incidence. Aussi, nos résultats montrent que l'ajout d'une « carre aérodynamique » sur la partie supérieure de la géométrie (rétro(a)) conduit à une couche limite plus turbulente sur cette partie et surtout à la génération d'une zone de recirculation plus intense, en amont du « bord de fuite » du rétroviseur. Seule une contribution au bruit large bande rayonné est alors observée dans cette zone.

5 Perspectives

Ayant localisé les zones d'intérêt en aval des rétroviseurs pour comprendre la génération de ces sifflements, il convient pour la suite d'étudier de plus près le champ aérodynamique autour du rétroviseur, en très proche paroi. De premiers essais de visualisation des zones de recirculation et des lignes de courant pariétales montrent la complexité du champ moyen (Figure 17).



Figure 18 : visualisation de l'écoulement en paroi par enduit (kaolin) sur retro(a) à 26 m/s

Les éventuelles zones de recirculation et les couches de cisaillement qui les bordent sont potentiellement lieu d'amplification de perturbations induisant le décollement et de feed-back aéroacoustique conduisant à l'amplification de fréquences pures (sifflement). Nous nous attacherons donc à les mettre en évidence dans la suite de nos travaux à l'aide de mesures aérodynamiques en très proche paroi (TR-PIV), et de mesures des fluctuations de pression pariétale.

Remerciements

Cette étude est réalisée dans le cadre de l'OpenLab Fluidics@Poitiers, PPRIME – PSA Peugeot Citroën.

Références

- Tam C.K.W. and Ju H., Aerofoil tones at moderate Reynolds number, J. Fluid Mech., vol. 690, pp 536-570. (2012)
- [2] Plogmann B., Herrig A. and Würz W., Experimental investigations of a trailing edge noise feedback mechanism on a NACA 0012 airfoil, *Exp. Fluids*, 54:1480. (2013)
- [3] Plogmann B. and Würz W., Aeroacoustic measurements on a NACA 0012 applying the Coherent Particle Velocity method., *Exp Fluids* 54:1556. (2013)
- [4] Paterson R.W., Vogt P.G., Fink M.R. and Munch C.L., Vortex noise of isolated airfoils, *Journal of Aircraft*, vol. 10, 296–302. (1973)
- [5] Arbey H. and Bataille J., Noise generated by airfoil profiles placed in a uniform laminar-flow, *J. of Fluid Mech, vol. 134, 33–47.* (1983)

- [6] Ono & al, Prediction of wind noise radiated from passenger cars and its evaluation based on auralization, *Journal of Wind Engineering*, 81, pp 403 – 419. (1999)
- [7] Dölek Ö, Özkan G and Özdemir I B, Structures of flow around a full scale side mirror of a car with relevance to aerodynamic noise, *Proc. Instn Mech. Engrs., vol* 2018, Part D : J. Automobile Engineering. (2004)