

Méthode de mesure de la matrice de diffusion multimodale d'obstacles complexes en présence d'écoulement uniforme

Hassen Trabelsi¹, Nicolas Zerbib², Jean-Michel Ville¹, Félix Foucart¹

¹Laboratoire Roberval, Centre de recherches Royallieu, F-60205 Compiègne,
hassen.trabelsi@utc.fr, jean-michel.ville@utc.fr, felix.foucart@utc.fr

²ESIGroup, 20 Rue Fonds Pernant, F-60200 Compiègne, nicolas.zerbib@esi-group.com

Afin d'améliorer le confort acoustique dans les véhicules, la ligne de climatisation automobile fait l'objet d'étude sur des guides d'onde, dans lesquels se superposent propagation acoustique et écoulement. Les phénomènes d'interaction entre écoulement et obstacles sont complexes, et le couplage induit de nombreux effets mal connus (génération de bruit par turbulence, apparition de sifflements, effet de l'écoulement sur les caractéristiques acoustiques des obstacles ...). Des recherches sont menées afin d'essayer de mieux comprendre et de prévoir les effets de cette interaction. Dans ce travail, on présente une méthode expérimentale pour la mesure de la matrice de diffusion multimodale d'un obstacle en présence d'écoulement uniforme. Cette approche permet de décrire les propriétés acoustiques d'un obstacle complexe et servira par la suite à l'estimation du niveau de bruit généré par l'interaction entre l'écoulement et cet obstacle. Les résultats expérimentaux sont issus de mesures réalisées sur un banc d'essai mis en place et développé au laboratoire. Une comparaison entre les cas « sans » et « avec » écoulement est présentée afin de comprendre l'effet de l'écoulement sur les propriétés acoustiques de l'obstacle. Un modèle élément finis, permettant la simulation numérique de l'expérience pour le cas sans écoulement, est développé et ses résultats sont confrontés aux résultats expérimentaux. Un très bon accord entre calcul et mesure est trouvé.

1 Introduction

Au laboratoire Roberval de l'Université de Technologie de Compiègne, une technique de mesure des propriétés acoustiques d'une discontinuité (changement de section [1], traitement acoustique [2], tubes HQ [3]) a été développée basée sur la mesure de la matrice de diffusion multimodale de la discontinuité en absence d'écoulement. Nous présentons dans ce papier une méthode de mesure de la matrice de diffusion multimodale d'obstacles complexes en présence d'écoulement uniforme. Nous faisons également une comparaison entre les cas sans et avec écoulement afin de voir l'effet de ce dernier sur les caractéristiques passives (réflexion, transmission, conversion modale...) de l'élément testé.

Dans la première section de ce travail, on rappelle la définition de la matrice de diffusion. Dans la deuxième section on présente le banc d'essai ainsi que le protocole de mesure développés pour la mesure de cette matrice. La troisième section présente une comparaison entre le calcul et la mesure sur quelques coefficients de la matrice de diffusion. Dans la quatrième section, les résultats expérimentaux de quelques coefficients de la matrice, obtenus pour les deux cas : sans écoulement et avec écoulement, sont comparés.

2 Matrice de diffusion

La matrice de diffusion multimodale $[D]_{2N \times 2N}$ d'un conduit compris entre les coordonnées z_g et z_d , voir Figure 1, relie linéairement le vecteur des pressions modales sortantes

$\{P^{so}\}_{2N} = \langle P_{00}^{I-}(z_g), \dots, P_{PQ}^{I-}(z_g), P_{00}^{II+}(z_d), \dots, P_{PQ}^{II+}(z_d) \rangle^T$
 et le vecteur des pressions modales entrantes
 $\{P^{en}\}_{2N} = \langle P_{00}^{I+}(z_g), \dots, P_{PQ}^{I+}(z_g), P_{00}^{II-}(z_d), \dots, P_{PQ}^{II-}(z_d) \rangle^T$
 par l'expression suivante :

$$\{P^{so}\}_{2N} = [D]_{2N \times 2N} \cdot \{P^{en}\}_{2N} \quad (1)$$

$$[D]_{2N \times 2N} = \begin{pmatrix} [D^{11}]_{N \times N} & [D^{12}]_{N \times N} \\ [D^{21}]_{N \times N} & [D^{22}]_{N \times N} \end{pmatrix}_{2N \times 2N}$$

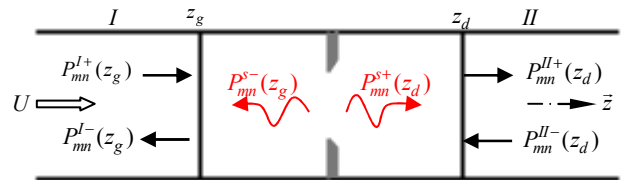


Figure 1 : présentation des pressions étudiées

Le vecteur $\{P^{en}\}_{2N}$ contient les pressions modales incidentes $P_{mn}^{I+}(z_g)$ et les pressions modales rétrogrades $P_{mn}^{II-}(z_d)$. Le vecteur $\{P^{so}\}_{2N}$ contient les pressions modales réfléchies $P_{mn}^{I-}(z_g)$ et les pressions modales transmises $P_{mn}^{II+}(z_d)$.

Cette matrice représente une caractérisation intrinsèque de discontinuités dans les conduits indépendante des

conditions acoustiques en amont et en aval de l'élément : elle dépend uniquement des caractéristiques géométriques et acoustiques du conduit. Elle est composée de $(2N)^2$ coefficients $\mathbf{D}_{mn,pq}^{kl}$; $k, l = 1, 2$ et $m, n, p, q = 1, 2, \dots, N$.

La matrice de diffusion contient des informations détaillées par mode des propriétés de réflexion, de transmission et de conversion. La signification physique de chaque matrice élémentaire est la suivante :

- $\left[\mathbf{D}_{mn,pq}^{11}\right]_{N \times N}$ contient les coefficients définissant la réflexion des modes arrivant du côté gauche du conduit $\mathbf{P}_{pq}^{1+}(\mathbf{z}_g)$ sur les modes sortants $\mathbf{P}_{mn}^{1-}(\mathbf{z}_g)$ du même côté,
- $\left[\mathbf{D}_{mn,pq}^{21}\right]_{N \times N}$ contient les coefficients définissant la transmission des modes arrivant du côté gauche du conduit $\mathbf{P}_{pq}^{1+}(\mathbf{z}_g)$ sur les modes sortants $\mathbf{P}_{mn}^{2+}(\mathbf{z}_d)$ du côté droit du conduit,
- $\left[\mathbf{D}_{mn,pq}^{22}\right]_{N \times N}$ contient les coefficients définissant la réflexion des modes arrivant du côté droit du conduit $\mathbf{P}_{pq}^{2-}(\mathbf{z}_d)$ sur les modes sortants $\mathbf{P}_{mn}^{2+}(\mathbf{z}_d)$ du même côté,
- $\left[\mathbf{D}_{mn,pq}^{12}\right]_{N \times N}$ contient les coefficients définissant la transmission des modes arrivant du côté droit du conduit $\mathbf{P}_{pq}^{2-}(\mathbf{z}_d)$ sur les modes sortants $\mathbf{P}_{mn}^{1-}(\mathbf{z}_g)$ du côté gauche du conduit.

3 Banc d'essai et protocole de mesure

3.1 Description du banc d'essai

Les mesures sont effectuées sur le banc développé dans le cadre du projet REVA/CESAM/SCA et qui a pour but la caractérisation passive et active des éléments constituant un système de conditionnement d'air pour automobiles. Ce banc est composé de deux parties, voir Figure 2.



Figure 2 : banc d'essai

La première partie du banc permet la mise en écoulement de l'air dans le conduit par un compresseur

centrifuge à vitesse variable et la réduction du bruit de l'écoulement grâce à deux silencieux à coulisses. La deuxième partie du banc est composée d'un caisson de tranquillisation de l'écoulement (écran anti-turbulence) et d'un conduit rectangulaire considéré comme rigide d'épaisseur 0.003 m ayant une largeur de 0.2 m et une hauteur de 0.1 m. Ce conduit est constitué de huit éléments : les deux terminaisons anéchoïques, le tronçon de mesure des données aérauliques, les deux tronçons source, les deux tronçons de mesure et le tronçon test. Les deux parties du banc sont séparées par un mur afin de réduire le bruit de fond dans le local de mesure.

Le système d'acquisition et de traitement des données comportent une chaîne de conversion analogique-numérique connectée à un micro-ordinateur équipé d'un système LMS. La Figure 3 présente la schématisation du dispositif expérimental.

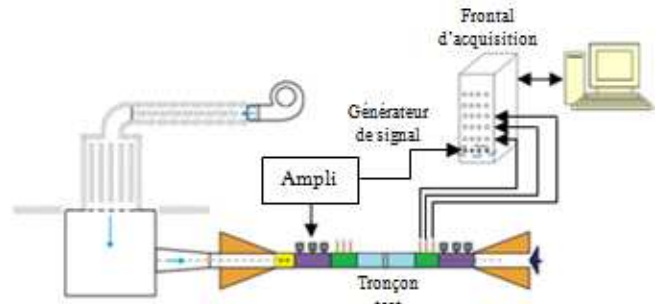


Figure 3 : schéma descriptif du banc d'essai

3.2 Protocole de mesure

La mesure de la matrice de diffusion multimodale d'un obstacle est basée sur la méthode multi-sources. Pour déterminer la matrice de diffusion, au moins $2N$ configurations indépendantes de sources doivent être réalisées. Ces configurations sont assurées par N positions du haut parleur du côté amont de l'obstacle et N autres positions du côté aval de l'obstacle. On construit ainsi les matrices des pressions entrantes $\left[\mathbf{P}^{en}\right]$ et des pressions sortantes $\left[\mathbf{P}^{so}\right]$ et par la suite la matrice de diffusion se calcule par la relation suivante :

$$\left[\mathbf{D}\right]_{2N \times 2N} = \left[\mathbf{P}^{so}\right]_{2N \times 2N} \cdot \left[\mathbf{P}^{en}\right]_{2N \times 2N}^{-1} \quad (2)$$

La Figure 4 présente l'algorithme d'obtention de la matrice de diffusion multimodale d'un obstacle par la méthode multi-sources. La bande de fréquence de notre étude est $[200 - 3500 \text{ Hz}]$. L'acquisition des signaux est faite à travers un frontal d'acquisition LMS qui nous permet la récupération des signaux temporaires moyennés (200 moyennes) issues des microphones et du signal de référence en sortie de l'amplificateur de puissance. Ce signal est de type sinus balayé et il est généré directement par le frontal d'acquisition à travers un haut parleur lié à un amplificateur de puissance. Après avoir récupéré tous les signaux, on procède au calcul des fonctions de transfert entre les signaux issus des microphones et le signal en sortie de l'amplificateur de puissance via MATLAB.

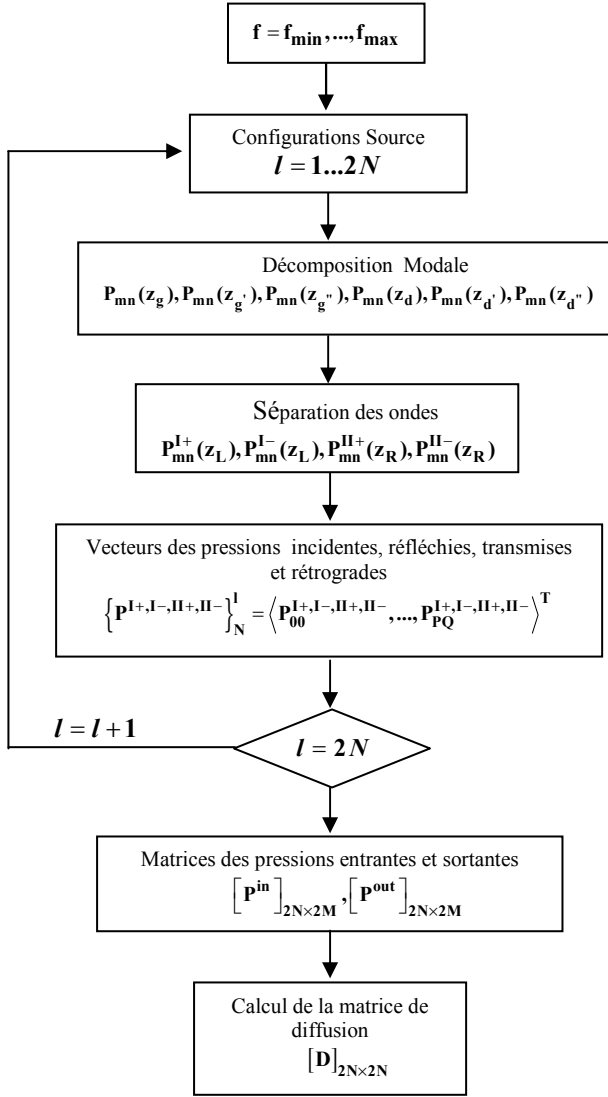


Figure 4 : organigramme de mesure de la matrice de diffusion

4 Simulation numérique

Dans cette partie on s'intéresse à la simulation numérique de l'expérience dans le cas sans écoulement, voir Figure 5. Le logiciel IDEAS-RAYON Vibro-Acoustics [4] est utilisé afin de calculer numériquement la matrice de diffusion multimodale $[D]$.

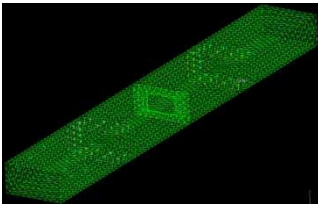


Figure 5: illustration du maillage Eléments Finis dans le cas du diaphragme pour un pas fixé à $\lambda/5$ à 3.5 kHz

La partie simulée du banc d'essai comporte les éléments situés entre les deux terminaisons anéchoïques, voir Figure 2.

En absence d'écoulement, le champ de pression vérifie l'équation d'Helmholtz et le problème revient à la

résolution du système, voir Eq. (3), par la méthode des éléments finis.

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{p} + \mathbf{k}^2 \mathbf{p} = \mathbf{f} \text{ dans } \Omega \\ \partial_n \mathbf{p} = 0 \text{ sur } \Gamma_r \\ \partial_n \mathbf{p} = -\mathbf{T}_e(\mathbf{p}) \text{ sur } \Gamma_e \\ \partial_n \mathbf{p} = -\mathbf{T}_s(\mathbf{p}) \text{ sur } \Gamma_s \end{cases} \quad (3)$$

Avec $\mathbf{p} = p_0 e^{i\omega t}$ est la pression acoustique, $\mathbf{n}$ désigne la normale sortante du domaine Ω , $\mathbf{k} = \omega/c$ est le nombre d'onde avec c la célérité du son. Dans Eq. (3), $\mathbf{f}$ représente une source ponctuelle à support compact positionnée dans le domaine Ω , Γ_r désigne les surfaces rigides du domaine et $\Gamma_{e,s}$ désignent deux surfaces introduites de façon fictive définissant ainsi les conditions aux limites vérifiées par le champ de pression totale aux extrémités du guide afin de tronquer le domaine d'étude dans le but de pouvoir utiliser une méthode d'Eléments Finis volumiques, voir Figure 6.

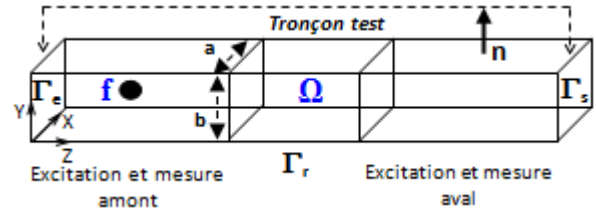


Figure 6: modèle pour la simulation numérique

5 Résultats

Dans cette partie on présente dans un premier temps une comparaison entre les résultats obtenus par la simulation numérique et ceux obtenus par les mesures réalisées sur le banc d'essai pour la détermination de la matrice de diffusion multimodale d'un diaphragme pour le cas sans écoulement. Ensuite, on présente les résultats de mesures pour la matrice de diffusion multimodale du diaphragme en présence d'écoulement uniforme à faible nombre de Mach ($M=0.033$).

La section du conduit est $S_c = 0.2 \times 0.1 m^2$. La section externe du diaphragme est $S_{d,ex} = 0.2 \times 0.1 m^2$, la section interne est $S_{d,in} = 0.1 \times 0.056 m^2$ ce qui donne un rapport des sections égale à 0.28. L'épaisseur du diaphragme est $e = 4 mm$.

5.1 Cas sans écoulement

La Figure 7 présente une comparaison entre les résultats obtenus par la simulation numérique et ceux obtenus par les essais pour les deux coefficients de la matrice de diffusion $D_{00,00}^{11}$ et $D_{00,00}^{21}$ qui représentent respectivement la réflexion et la transmission du mode plan sur lui-même. D'après cette figure on peut noter le très bon accord entre le calcul et l'expérience sur toute la bande de fréquence étudiée. Cette bonne corrélation est vérifiée aussi en conversions modales comme l'illustre la Figure 8. Cette figure montre un exemple de conversion modale: la conversion en transmission du mode 00 vers le mode 02. Le diaphragme étudié met en évidence la conversion modale des modes ayant un indice verticale « m » nul et un

indice horizontal « n » pair ou impair des deux modes (exemple : conversion en transmission et en réflexion du mode 00 vers les modes 02, 04 et vice versa, conversion en transmission et en réflexion du mode 01 vers le mode 03 et vice versa).

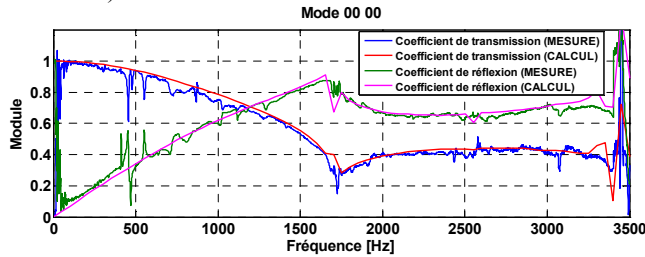


Figure 7: comparaison essai-calcul sur la réflexion et la transmission du mode 00 sur lui-même

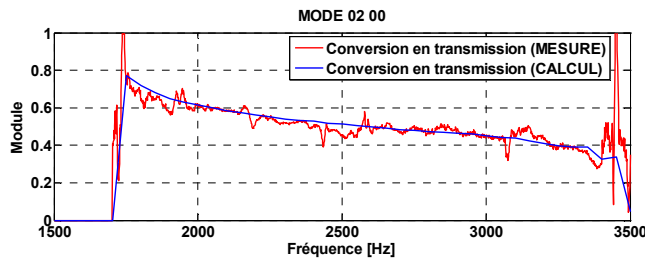


Figure 8: Comparaison essai-calcul sur le coefficient de conversion en transmission du mode 00 sur le mode 02

5.2 Cas avec écoulement

Les figures 9 et 10 illustrent l'effet de l'écoulement sur, respectivement, la transmission et la réflexion du mode plan sur lui-même. On constate que l'amplitude du coefficient de transmission a diminué sur toute la bande de fréquence, voir Figure 9. Tandis que la réflexion pour les cas sans et avec écoulement est presque la même, voir Figure 10. D'après cela, on peut conclure que l'interaction entre l'écoulement et le diaphragme met en évidence des pertes par transmission.

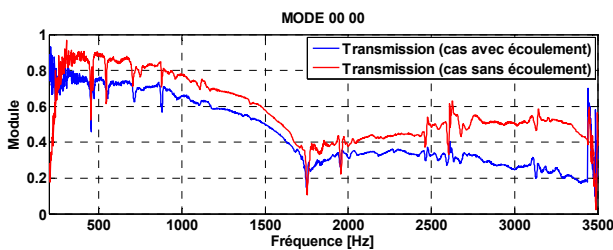


Figure 9: effet de l'écoulement sur la transmission du mode 00 sur lui-même

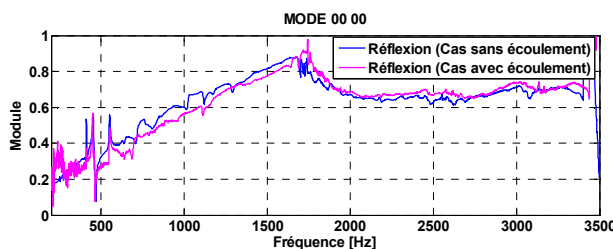


Figure 10: effet de l'écoulement sur la réflexion du mode 00 sur lui-même

Pour les modes d'ordres élevés, comme par exemple le mode 10, voir Figure 11, on trouve le même effet de

l'écoulement sur la transmission bien que sur la réflexion. Aussi, on voit bien que ce mode se réfléchit plus que le mode 00 ce qui met en évidence la caractéristique sélective du diaphragme via certains modes.

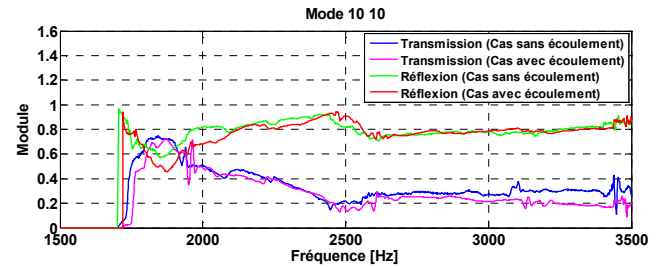


Figure 11: effet de l'écoulement sur la transmission et la réflexion du mode 10 sur lui-même

6 Conclusions

Dans ce travail, un banc d'essai permettant la caractérisation acoustique des obstacles en présence d'écoulement uniforme à faible nombre de Mach a été développé. A travers ce banc d'essai et au protocole de mesure mis en place, on a pu mesurer la matrice de diffusion multimodale d'un diaphragme, valider le modèle de simulation numérique développé pour le cas sans écoulement, comprendre l'effet de l'écoulement sur les propriétés acoustiques en transmission et en réflexion du diaphragme ainsi que les phénomènes de conversion modales mis en évidence par ce dernier.

L'obtention et la compréhension de ces résultats vont nous permettre dans la suite de travail de mesurer le niveau de bruit généré par l'interaction entre l'écoulement et le diaphragme et par la suite d'appliquer cette technique de mesure pour la caractérisation acoustique d'obstacles beaucoup plus complexes que le diaphragme et plus précisément les composants d'un climatiseur d'automobile dans le but de réduire le niveau de bruit rayonné dans l'habitacle.

Remerciements

Ce travail est réalisé dans le cadre du projet REVA/CESAM/SCA du "Pôle de Compétitivité I-TranS – Région Nord Pas de Calais Picardie" en coordination avec Valeo Thermique Habitacle.

Bibliographie

- [1] Sittel, A., Ville, J.-M., Foucart, F., "Multiload procedure to measure the acoustic scattering matrix of a duct discontinuity for higher order mode propagation conditions", *J. Acoust. Soc. Am.* 120 (5), 2478-2490 (2006).
- [2] Taktak M. "Mesure de la matrice de diffusion d'un tronçon traité cylindrique: applications à la mesure de son efficacité et à la détermination de son impédance homogénéisée". *Université de Technologie de Compiègne*. Thèse (2008).
- [3] Poirier B., "Développement d'un modèle analytique pour le calcul de la matrice de diffusion d'un tronçon composé de tubes Hershel-Quincke", *Université de*

Technologie de Compiègne. Thèse (2008).

- [4] Hamdi M.A., Mebarek L. "User's guide for RAYON-Ideas Vibro-Acoustic". October (1998).
- [5] Lavrentjev J., Aböm M. "Characterisation of fluid machines as acoustic multi-port sources", *Journal of Sound and Vibration*. 197 (1), 1-16 (1996).
- [6] Allam S., Aböm M. "Advanced experimental procedure for in-duct aero-acoustics". *ICSV13*. 2-6 July (2006).
- [7] Aböm M., Bodèn H., Lavrentjev J., "Source characterization of fans using acoustic 2-port models". *Proceedings of fan Noise 92*. 359-364 (1992).
- [8] Lavrentjev J., Aböm M., Bodèn H. "A measurement method for determining the source data of acoustic two-port sources", *Journal of Sound and Vibration*. 183, (3), 517-531 (1995).
- [9] Drissi D., "Simulation des silencieux d'échappement par une méthode d'éléments finis homogénéisée". *Université de Tunis*. Thèse Juin (2003).
- [10] Bonnet-Ben Dhia A.S., and al., "Condition aux limites transparente pour la propagation acoustique dans un guide recouvert d'un matériau absorbant en présence d'écoulement uniforme". *18 congrès of mecanic*. Agust (2007).
- [11] Amestoy P-R., Duff I-S., Koster J., L'Excellent J-Y., Pralet S. "Multifrontal Massively Parallel Solver, MUMPS 4.9". *Users' guide, CERFACS, ENSEEIHT*. July (2009).