

CFA/VISHNO 2016

Etude aéroacoustique d'un double diaphragme en conduit avec un écoulement à faible nombre de Mach

S. Bennouna^a, N. Papaxanthos^b, B. Ouedraogo^b, S. Moreau^b, E. Perrey-Debain^b, J.-M. Ville^b et O. Cheriaux^a

^aValeo Thermal Systems, 8 rue Louis Lormand, 78320 La Verrière, France

^bSorbonne universités, Université de Technologie de Compiègne, Laboratoire Roberval, UMR CNRS 7337, CS 60319, 60203 Compiègne, France
solene.moreau@utc.fr



LE MANS

Le Système de Ventilation d'Air (SVA) d'un véhicule automobile doit fournir un débit d'air suffisant pour assurer le confort thermique des passagers à l'intérieur de l'habitacle sans endommager l'environnement acoustique. Les sources acoustiques principales du SVA proviennent du pulseur et de l'interaction entre l'écoulement d'air et les éléments composants le système. Le programme de recherche CEVAS (Conception d'Equipements de Ventilation d'Air Silencieux), piloté par l'équipementier Valeo, est actuellement en cours pour développer un outil numérique d'aide à la conception d'un SVA à faible niveau acoustique. Le laboratoire Roberval de l'Université de Technologie de Compiègne (UTC) est en charge de la caractérisation expérimentale et numérique des sources aéroacoustiques. La caractérisation aéroacoustique de deux diaphragmes insérés dans un conduit rectangulaire est réalisée à partir de la matrice de diffusion déterminée expérimentalement par la méthode 2N-ports et par le calcul numérique CAA (Computational AeroAcoustics) basé sur l'analogie de Lighthill. En outre, des mesures aérauliques par PIV sont réalisées. Plusieurs distances de séparations entre les deux diaphragmes sont étudiées pour différentes vitesses d'écoulement. On montre que l'association des deux diaphragmes peut produire des niveaux de puissance acoustique beaucoup plus élevés que le niveau produit par deux diaphragmes très éloignés. Pour certaines configurations, des phénomènes de rétroaction responsables de pics de puissance acoustiques en basse fréquence sont mis en évidence.

1 Introduction

Le bruit généré dans l'habitacle d'une automobile est fonction des équipements embarqués notamment le Système de Ventilation d'Air (SVA). Il devient prépondérant pour les véhicules hybrides et électriques et représente donc un enjeu crucial pour les constructeurs et équipementiers automobiles soucieux d'accroître le confort acoustique dans l'habitacle. C'est dans ce contexte que le projet CEVAS (Conception d'Equipements De Ventilation d'Air Silencieux), piloté par l'équipementier Valeo, dont l'objectif est de développer un outil d'aide à la conception silencieuse des SVA a été élaboré. Cet outil s'appuie sur des développements en modélisation numérique et méthodes expérimentales destinées à caractériser sur le plan aéro-acoustique les composants mobiles (pulseur) et fixes (évaporateur, volet, filtre, grille...) d'un SVA situés dans un conduit compact de section moyenne rectangulaire transportant le fluide vers l'habitacle automobile.

Dans le cadre de ce projet, la caractérisation aéro-acoustique d'un diaphragme [1] a montré un très bon accord entre les résultats expérimentaux et numériques des niveaux de pression acoustique en dB produits par l'interaction entre un écoulement à nombre de Mach $M = 0,02$ et un diaphragme jusqu'à une fréquence maximale de 3500Hz en présence de $N = 10$ modes propagatifs.

Le cahier des charges fourni par le constructeur du véhicule impose un espace restreint pour le SVA avec comme conséquence une grande proximité entre les composants. Une étude réalisée sur une climatisation automobile a montré qu'augmenter la distance entre un volet papillon et une grille de sortie d'air permet de réduire le SPL jusqu'à 8 dB [2]. De plus, des études menées sur un SVA [3] pour le bâtiment basées sur des travaux de Nelson et Morfey [4] ont montré comment une association d'obstacles peut produire des niveaux de bruit d'origine aéro-acoustique bien supérieurs à ceux prédits par des guides utilisés par l'industrie [5] où les effets d'interaction sont négligés.

Pour pouvoir définir des règles de conception évitant ces effets d'interaction, une étude relative au bruit produit en conduit par un écoulement à faible nombre de Mach impactant une association de 2 diaphragmes identiques a été réalisée. Plusieurs distances entre les deux diaphragmes et plusieurs vitesses d'écoulement sont étudiées. Le banc d'essai et les procédures de mesure des propriétés aérauliques (débitmètre et perte de charge) et

acoustiques (matrice de diffusion et vecteur source) du double diaphragme sont similaires à ceux présentés en [6] et ne sont donc pas détaillés. Parmi les différentes méthodes numériques de prédiction du bruit, nous utilisons la méthode hybride basée sur une simulation instationnaire et incompressible de l'écoulement. Cette méthode représente un bon compromis en termes de précision et temps de calcul, et est couramment utilisée à faible nombre de Mach et haut nombre de Reynolds [1, 7]. Cependant, la séparation entre la modélisation des phénomènes hydrodynamiques d'un côté, et le calcul du bruit qui en résulte d'un autre, rend impossible l'interaction des deux. Nous mettons en évidence dans les résultats numériques l'absence des pics de puissance dus à ces effets d'interaction.

2 Approche expérimentale

Le banc d'essai [8] a été conçu, à partir du cahier des charges de Valeo, pour mesurer à $M < 0,1$ les propriétés aéro-acoustiques d'un composant dans un conduit rectangulaire de section droite $0,2 \times 0,1 \text{ m}^2$ pour une fréquence maximale de 3,4KHz. Le banc d'essai est instrumenté pour la mesure des grandeurs aérauliques (débit, perte de charge) et acoustiques (réflexion/transmission et bruit rayonné par la source).

2.1 Mesures aérauliques

La mesure de débit est réalisée grâce à un débitmètre anémométrique à fil chaud.

La perte de charge générée par un composant ΔP est mesurée à l'aide d'un capteur de pression différentielle interne placé en amont du conduit dans un caisson de tranquillisation de l'écoulement. La perte de charge générée par le composant seul correspond à la différence entre la perte de charge du conduit sans composant et celle du conduit équipé d'un composant.

2.2 Mesures acoustiques

Les propriétés aéro-acoustiques d'un composant en conduit sont obtenues par un modèle 2N-port [9] où N est le nombre de modes propagatifs. Ce modèle qui suppose un système linéaire, permet une caractérisation acoustique intrinsèque d'un tronçon de conduit contenant un composant

constituant en présence d'un écoulement une source aéro-acoustique. Basé sur le schéma décrit sur la Figure 1, le modèle est représenté par

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

$$\begin{Bmatrix} P_{mn}^{l-} \\ P_{mn}^{ll+} \end{Bmatrix}_{2N} = [D]_{2N \times 2N} \cdot \begin{Bmatrix} P_{mn}^{l+} \\ P_{mn}^{ll-} \end{Bmatrix}_{2N} + \begin{Bmatrix} P_{mn}^{s+} \\ P_{mn}^{s-} \end{Bmatrix}_{2N} \quad (2)$$

avec $\{P^{so}\}_{2N}$ le vecteur des pressions sortantes, $\{P^{en}\}_{2N}$ le vecteur des pressions entrantes. L'expérience a pour objectif de mesurer $\{P^s\}_{2N}$ le vecteur source et $[D]_{2N \times 2N}$ la matrice de diffusion multimodale en présence d'écoulement.

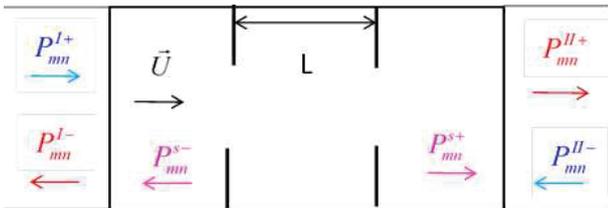


FIGURE 1 – Schéma de principe de la représentation par le modèle 2N-ports du tronçon avec un double diaphragme.

La méthode de mesure des caractéristiques passives et actives d'un composant [1, 6] est composée de deux étapes :

- Mesure par la méthode 2N-sources [10] de la matrice de diffusion multimodale $[D]_{2N \times 2N}$ du composant et des matrices de réflexion $[R^{ter}]_{2N \times 2N}$ des deux terminaisons situées en amont et en aval du conduit
- Mesure de la matrice interspectrale puis calcul de la matrice des pressions acoustiques modales rayonnées en amont et en aval par la source connaissant les matrices mesurées dans la première phase.

3 Caractérisation aéro-acoustique d'un double diaphragme

3.1 Tronçon test et configurations testées

Les deux diaphragmes réalisés en plexiglass sont identiques avec des bords droits, une épaisseur de 8mm et une section d'ouverture de $0,1 \times 0,056\text{m}^2$ centrée sur l'axe du conduit (voir Figure 2).

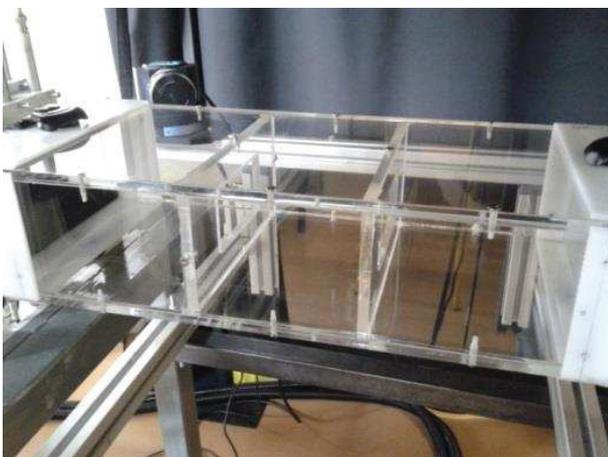


FIGURE 2 – Tronçon avec un double diaphragme.

Le Tableau 1 indique les configurations testées en précisant les distances entre les deux diaphragmes L , les débits d'air incident Q , la vitesse moyenne U et la perte de charge due au composant ΔP .

3.2 Mesures acoustiques

3.2.1 Matrice de diffusion

La Figure 3 présente les modules de $D_{00,00}^{21}$ associés à la transmission du mode plan sur lui-même pour différents débits Q . Pour une distance $L = 0,13\text{m}$, l'écoulement modifie considérablement le module de $D_{00,00}^{21}$ en dessous de 1000Hz. En présence d'écoulement, ce coefficient de transmission passe par des maxima et minima prononcés à des fréquences particulières.

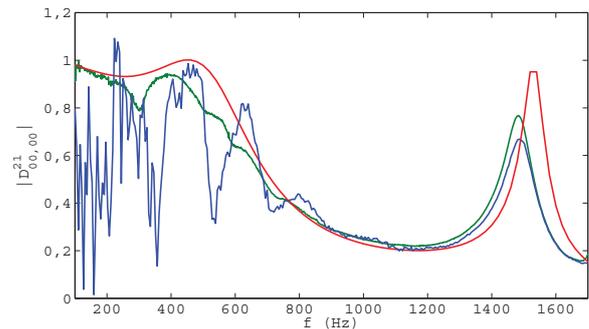


FIGURE 3 – Influence de Q sur le module de $D_{00,00}^{21}$ pour $L = 0.13\text{m}$: $Q = 0\text{kg/h}$ (bleu), $Q = 150\text{kg/h}$ (rouge), $Q = 300\text{kg/h}$ (vert).

3.2.2 Critère de sifflement

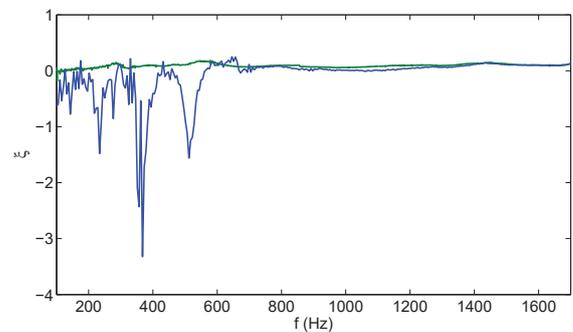


FIGURE 4 – ...

3.2.3 Puissance rayonnée mesurée et calculée

Les résultats du vecteur source sont présentés sous la forme d'un spectre du niveau de puissance acoustique SWL rayonnée par la source en amont et en aval du double diaphragme. Sur la Figure 5, les SWL rayonnées vers l'aval par les 3 sources aéroacoustiques associées aux 3 longueurs L sont comparées au SWL d'un seul diaphragme.

Le SWL est plus élevé pour un double diaphragme que pour un simple diaphragme. En dessous de 1000Hz, le SWL a des pics prononcés aux mêmes fréquences particulières que pour le module de $D_{00,00}^{21}$. Ces pics correspondent à des sifflements dont le niveau et la fréquence dépendent de L .

TABLEAU 1 – Configurations testées.

L (en m)	0.06				0.13					0.21				
L/D_{eq}	0.38				0.81					1.32				
Q (en kg/h)	150	300	450	600	150	300	338	450	600	150	300	338	450	600
U (en m/s)	1.7	3.5	5.2	6.9	1.7	3.5	3.9	5.2	6.9	1.7	3.5	3.9	5.2	6.9
ΔP (en Pa)	34	132	290	515	45	177	222	388	693	49	201	252	469	812

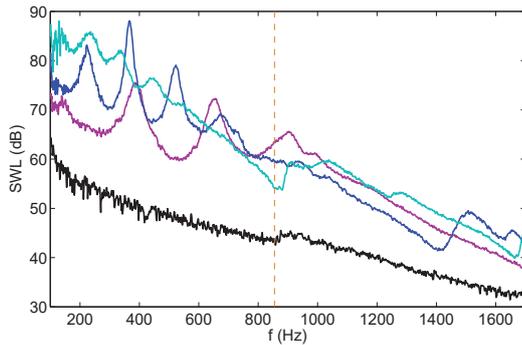


FIGURE 5 – Influence de L sur le SWL rayonné en aval pour un double diaphragme pour $Q = 600\text{kg/h}$: $L = 0.06\text{m}$ (bleu), $L = 0.13\text{m}$ (rouge), $L = 0.21\text{m}$ (vert) et comparaison avec le SWL pour un diaphragme (noir) - **Nicolas, merci de changer les couleurs ou la légende et d'enlever la fréquence de coupure.**

Les résultats de mesure de la matrice de diffusion et du vecteur source ont mis en évidence des effets d'interaction entre les 2 diaphragmes en présence d'un écoulement. La distance entre les deux diaphragmes L et le débit de l'écoulement Q sont deux paramètres qui influent sur ces effets d'interaction.

Le calcul numérique prédictif est réalisé en deux temps. Une première étape consiste à modéliser la turbulence par une simulation incompressible LES (Large Eddy Simulation) dont les données sauvegardées servent à la résolution de l'équation de Lighthill par méthode intégrale, la seconde étape. La configuration étudiée correspond à un agencement de deux diaphragmes espacés de $L = 0.13\text{ m}$ pour un débit de $Q = 338\text{ kg/h}$. Les paramètres de la simulation LES correspondante sont similaires à ceux d'une précédente étude et ne sont pas rappelés [11]. L'équation de Lighthill s'écrit

$$(\Delta + k^2)p = q \quad \text{avec} \quad q = -\frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}. \quad (3)$$

Pour un écoulement isentropique à faible nombre de Mach et haut nombre de Reynolds, le tenseur de Lighthill se simplifie en $T_{ij} = \rho_0 u_i u_j$ et peut être fourni par la simulation LES incompressible. La méthode intégrale adoptée s'affranchit de la sauvegarde des sources de bruit durant la simulation CFD (Computer Fluid Dynamics) et consiste à calculer un terme correctif à la pression fournie par la simulation incompressible LES [11]. La Figure 6 montre de bonnes corrélations calcul/mesure. Autour de 1520 Hz, la cavité formée par les deux diaphragmes résonne longitudinalement (voir Figure 7) ce qui se traduit par un pic de puissance.

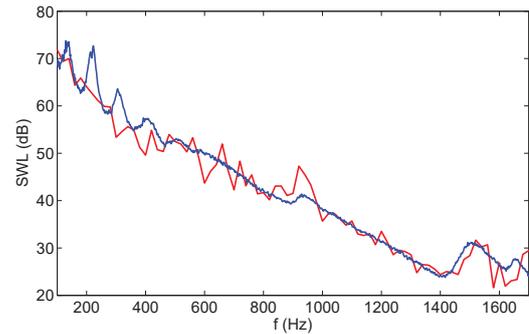


FIGURE 6 – Niveaux de puissance rayonnée à l'aval de l'obstacle : calculés (bleu) et mesurés (rouge).

Un maximum de transmission du mode plan sur lui-même avait été observé à cette fréquence Figure 3. Contrairement à la mesure, aucun pic de puissance en basses fréquences ne ressort du résultat calculé montrant ainsi la limite de la méthode hybride basée sur un calcul CFD incompressible.

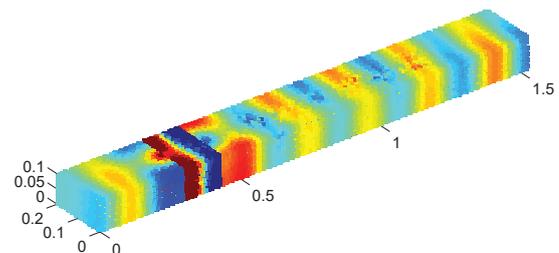


FIGURE 7 – Partie réelle de la pression pariétale, niveaux compris entre -0.8 et 0.8 Pa . La cavité formée par les deux diaphragmes est comprise entre les abscisses 0.3 et 0.43 m .

Nicolas - merci de mettre l'échelle et préciser la fréquence

3.2.4 Effet de rétroaction

De très nombreux travaux expérimentaux et théoriques ont été réalisés pour prédire et réduire le bruit rayonné par l'interaction d'un écoulement en conduit ou pas avec des éléments divers comme une cavité [12], une fente [13, 14], un organe de la voix humaine [15], un instrument de musique [16], une bouilloire [17]. Tous ces sons très intenses sont produits à certaines fréquences par un mécanisme physique

déjà pressenti par Lord Rayleigh [18] et identifié par Rossiter [19] dans le cas d'un écoulement rasant sur une cavité.

Pour le cas du double diaphragme, le mécanisme physique commence avec l'impact de l'écoulement sur le premier diaphragme qui génère des tourbillons en aval de celui-ci. L'impact de ces tourbillons sur le second diaphragme crée des perturbations et transforme aussi une part de l'énergie du champ de vorticité en énergie acoustique. Ceci a un effet de rétroaction dit 'direct' en créant des tourbillons sur le premier diaphragme. Si un résonateur acoustique est présent, l'onde acoustique peut exciter ce résonateur et créer de nouvelles ondes acoustiques dont l'effet de rétroaction est dit 'indirect' en créant des tourbillons sur le premier diaphragme. Dans notre montage, les terminaisons étant 'an choiques' en amont et en aval du double diaphragme, les volumes de part et d'autre ne sont pas résonants et la rétroaction est donc uniquement directe.

Dans un conduit de diamètre D_0 avec deux orifices de diamètre D_1 tel que $\frac{D_1}{D_0} = 0,3$ et distants de L , Coiret *et al.* [20] ont montré expérimentalement que le bruit produit par un écoulement impactant ces deux orifices peut atteindre des niveaux supérieurs à 120dB répartis sur quelques fréquences lorsque $0.1 < \frac{L}{D_0} < 1$ et jusqu'à des nombres de Reynolds de 3.10^4 . Le Tableau 1 indique le rapport L/D_{eq} pour nos configurations avec avec D_{eq} le diamètre équivalent du conduit rectangulaire. Un effet d'interaction acoustique direct négligeable est attendu pour $L = 0,21m$ et important pour les deux autres distances ($L = 0,06m$ et $L = 0,13m$).

Sur la Figure 8, tous les spectres SWL mesurés associés aux couples $[L, Q]$ sont reportés en fonction du nombre de Strouhal

$$St = (fL)/U_c \tag{4}$$

avec la vitesse de convection des tourbillons

$$U_c = \kappa * U_d, \tag{5}$$

la vitesse de constriction [22]

$$U_d = \frac{Q}{S\sigma}, \tag{6}$$

S la surface du conduit, $\sigma = (\sqrt{C_L} - 1)/(C_L - 1)$ le rapport de constriction, $C_L = \Delta PS^2/(0.5\rho_0 Q^2)$ le coefficient de perte de charge, ρ_0 la masse volumique et κ un coefficient empirique dont les valeurs sont données dans le Tableau 2. D'après [13, 17], ces fréquences discrètes sont à associer aux modes hydrodynamiques n correspondant à un nombre de tourbillons présents à l'instant t entre les 2 diaphragmes. De plus, la puissance acoustique de la source est concentrée sur les 5 premiers modes hydrodynamiques [13] et elle croit avec le débit de l'écoulement Q et décroit avec la distance entre les deux diaphragme L .

TABLEAU 2 – Valeurs de κ en fonction de la distance entre les deux diaphragmes L .

L (en m)	0.06	0.13	0.21
κ	0.60	0.66	0.66

Pour chaque configuration $[L, Q]$, les valeurs des fréquences discrètes f_n (avec n le mode hydrodynamique) sont extraites sur les spectres des SWL . Les fréquences

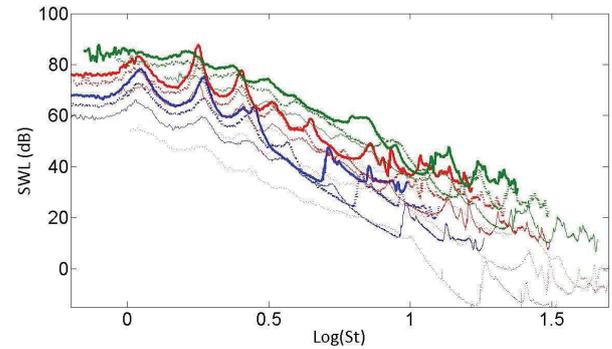


FIGURE 8 – SWL rayonnés en aval en fonction de St pour les configurations aéro-acoustiques testées : $Q = 150kg/h$ (pointillé), $Q = 300kg/h$ (trait plein), $Q = 150kg/h$ (pointillé gras), $Q = 150kg/h$ (trait gras), $L = 0.06m$ (bleu), $L = 0.13m$ (rouge), $L = 0.21m$ (vert).

discrètes f_n sont déterminées avec moins de précision lorsque n augmente. La Figure 9 montre le tracé des valeurs du nombre de Strouhal

$$St_n = (f_n L)/U_c \tag{7}$$

en fonction du nombre de Reynolds

$$Re = UL/\nu \tag{8}$$

avec ν la viscosité ($\nu = 1.54.10^{-5}m^2/s$ pour l'air).

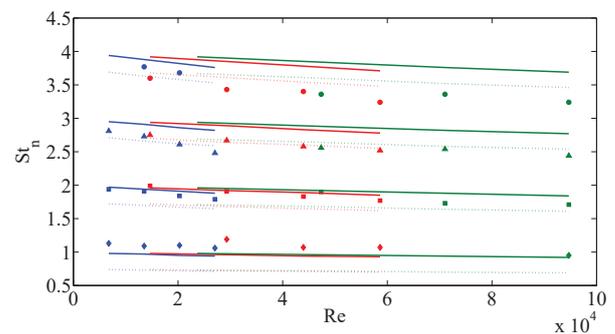


FIGURE 9 – Variation de St_n en fonction Re pour l'ensemble des configurations testées ; valeurs expérimentales : St_1 (losange), St_2 (carré), St_3 (triangle), St_4 (cercle) ; valeurs théoriques : pour $\alpha = 0$ (trait plein) et pour $\alpha = 0.25$ (trait pointillé) ; $L = 0.06m$ (bleu), $L = 0.13m$ (rouge), $L = 0.21m$ (vert).

Rossiter [19] a proposé une relation empirique qui permet de prédire les fréquences discrètes émises

$$f_{n,Rossiter} = \frac{U_c(n - \alpha)}{L(\frac{U_c}{c_0} + 1)} \tag{9}$$

avec c_0 la célérité acoustique et α la phase entre l'impact du tourbillon sur le second diaphragme et le départ de l'onde acoustique vers l'amont (si $\alpha = 0$, l'onde acoustique démarre à l'impact du tourbillon sur le second diaphragme). La valeur de α dépend de la nature de l'orifice et est déterminée empiriquement. Dans le cas du bruit de fente [14] $-0.25 < \alpha < 0.25$ alors que $\alpha = 0,25$ pour le cas d'un écoulement rasant sur une cavité [12] et le cas d'un double diaphragme [21].

Les résultats théoriques sont représentés à la Figure 9 en remplaçant la fréquence f_n trouvée expérimentalement par la fréquence théorique de Rossiter $f_{n,Rossiter}$ pour $\alpha = 0$ et $\alpha = 0.25$. Théoriquement, pour chaque distance L , plus le mode hydrodynamique n est élevé et plus le nombre de Strouhal St_n diminue fortement avec le nombre de Reynolds Re . Les valeurs expérimentales suivent la même tendance avec une valeur de α qui augmente avec le mode hydrodynamique ($\alpha = -0.1$ pour $n = 1$ et $\alpha = 0.25$ pour $n = 3$).

4 Conclusion

A finir Les résultats de mesure des caractéristiques aéroacoustiques d'un double diaphragme situés dans un conduit ont été présentées en fonction de la distance L de séparation et du débit de l'écoulement Q . Les effets d'interaction entre les diaphragmes sont mis en évidence pour des $L/D_{eq} \leq 1.32$ avec :

- des niveaux intenses du SWL des sources qui dépendent de L et de Q
- des fréquences discrètes proches des fréquences de 'Rossiter'.

Dans le cas $L/D > 1$, très bon accord entre le résultat du SWL mesuré et calculé. Développer un calcul pour $L/D < 1$ Préconiser des règles de conception pour l'assemblage des éléments de la climatisation. [Une simulation compressible s'avère nécessaire pour la prédiction de ces amplifications du bruit.](#)

Remerciements

Les auteurs remercient la Région Picardie et le FEDER pour leurs aides financières.

Références

- [1] N. Papaxhantos, E. Perrey Debain, B. Ouedraogo, S. Moreau, J.-M. Ville et F. Foucart, Prediction of air flow noise in ducts due to the presence of fixed obstacles, *Euronoise*, Maastricht (2015)
- [2] S. Guerin, E. Thomy et M. C. M. Wright, Aeroacoustics of automotive vents, *Journal of Sound and Vibration* **285**, 859-875 (2005)
- [3] C. M. Mak and J. Yang, A prediction method for aerodynamic sound produced by closely spaced elements in air ducts, *Journal of Sound and Vibration* **229(3)**, 743-753 (2000)
- [4] P. A. Nelson and C. L. Morfey, Aerodynamic sound production in low speed flow ducts, *Journal of Sound and Vibration* **79**, 263-289 (1981)
- [5] *ASHRAE Handbook - HVAC Applications*, SI Edition (2003)
- [6] S. Bennouna, B. Ouedraogo, S. Moreau, J.-M. Ville, F. Foucart et O. Cheriaux, Caractérisation acoustique d'un diaphragme dans un conduit avec écoulement à faible nombre de Mach, *CFA*, Poitiers (2014)
- [7] P. Martinez-Lera, R. Hallez, H. Bériot, C. Schram, Computation of sound in a simplified HVAC duct based on aerodynamic pressure, *18th AIAA/CEAS aeroacoustics conference*, Colorado (2012)
- [8] H. Trabelsi, Banc d'essai et procédure pour la caractérisation des éléments d'un HVAC par un système "2N-ports" avec écoulement : validation et application à des sources aéroacoustiques, *Thèse de l'Université de Technologie de Compiègne* (2011)
- [9] J. Lavrentjev et M. Abööm, Characterization of fluid machines as acoustic multi-port sources, *Journal of Sound and Vibration* **197(1)**, 1-16 (1996)
- [10] A. G. Doige, M. L. Munjal, H. S. Alves, An improved experimental method for determining transfer matrices of pipeline elements with flow, *International Journal of Aeroacoustics*, 481-485 (1988)
- [11] N. Papaxhantos, E. Perrey Debain, On the use of integral formulations for the prediction of air flow noise in ducts, *The 22nd International Congress on Sound and Vibration*, Florence (2015)
- [12] M. El Hassan, L. Labraga et L. Keirsbulck, Aeroacoustic oscillations inside large deep cavities, *16th Australasian fluid mechanics conference*, Australie (2007)
- [13] A. Billon, Etude expérimentale des sons auto-entretenus produits par un jet issu d'un conduit et heurtant une plaque fendue, *Thèse Université de La Rochelle/Pôle sciences et Technologie* (2003)
- [14] M. Gessler, Sons auto-entretenus produits par l'interaction d'un jet plan avec une plaque fendue : étude expérimentale et modélisation du couplage avec un résonateur, *Thèse Université de La Rochelle/Pôle sciences et Technologie* (2006)
- [15] T. A. Wilson, Experiments on the fluid mechanics of whistling, *Journal of the Acoustical Society of America* **50(1)**, 366-372 (1970)
- [16] S. Dequand, J. F. H. Willems, M. Leroux, R. Vullings, M. Van Weert, C. Thieulot et A. Hirschberg, Simplified models of flue instruments : Influence of mouth geometry on the sound source, *Journal of the Acoustical Society of America* **113(1)**, 1724-1735 (2003)
- [17] R. H. Henrywood et A. Agarwal, The aeroacoustics of a steam kettle, *Physics of fluids* **25**, 107101, (2013)
- [18] J. W. S. Rayleigh, *The theory of sound*, Dover (1945)
- [19] J. E. Rossiter, Wind tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds, Aeronautical research council, report and memorandum 64037 (1964)
- [20] A. Coiret, S. Guerin, A. Sakout et R. Henry, A numerical approach of self-sustained tone generation and reduction in ducts, *Journal of low frequency noise, vibration and active control* **20(1)**, 21-31 (2001)

- [21] F. Mendonça, A. Read, S. Caro, K. Debatin, B. Caruelle, Aeroacoustic simulation of double diaphragm orifices in aircraft climate control system, *11th AIAA/CEAS aeroacoustics conference*, Californie (2005)
- [22] O. Kårekull, G. Efrimsson et M. Åbom, Prediction model of flow duct constriction noise, *Applied Acoustics* , **82**, 45-52 (2014)