

CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018
14^{ème} Congrès Français d'Acoustique



Concepts originaux de silencieux passifs pour l'aéronautique

J.-M. Ville et E. Perrey-Debain

Université de Technologie de Compiègne, Rue Doct Schweitzer, CS 60319, 60203 Compiègne, France
jean-michel.ville@utc.fr

L'étude de l'efficacité des silencieux pour réduire le bruit rayonné par l'entrée d'air ou l'échappement d'un moteur d'avion nécessite la mise en œuvre de moyens de mesure et d'outils de modélisation qui soient proches des conditions aéro-acoustiques d'utilisation de ces systèmes, on peut citer notamment le contexte parfois hautement multimodal dû aux dimensions mises en jeu ainsi que la présence d'un écoulement porteur occasionnant des effets de convection important sur la propagation des ondes. L'UTC travaille en relation avec l'industrie aéronautique sur des concepts originaux de traitements acoustiques qui puissent satisfaire un cahier des charges contraignant excluant a priori les matériaux poreux classiques. L'analyse et la confrontation des résultats des matrices de diffusion calculés par modélisation numérique avec ceux issus des essais menés sur le banc d'essai de section circulaire et développé dans le cadre du projet européen DUCAT ont été réalisées pour trois types de liners : (i) des liners composés de tubes Herschel Quincke associés en série et intégrés à un traitement classique type plaque perforée-nid d'abeille ont montré une efficacité notable aux fréquences de passage des pales tout en maintenant un bon niveau d'atténuation sur une large gamme fréquentielle. Un brevet a été déposé sur ce principe. (ii) L'étude d'un traitement acoustique composé d'une plaque perforée et d'une mousse métallique a montré que ce concept de liner non localement réactif s'avère intéressant pour le traitement des basses fréquences. (iii) Dans le cadre d'une démarche de conception d'un silencieux pour le conduit d'échappement d'un moteur d'hélicoptère qui prend en compte la contenu modal du champ incident et le spectre d'émission de la source, un matériau composé d'une plaque perforée placée sur des cavités résonantes est étudié en fonction de leurs distributions axiale et angulaire.

1 Introduction

Depuis des années, les traitements acoustiques disposés dans les nacelles qui entourent les moteurs des avions sont basés sur un concept plaque perforée-nid d'abeille dit dans ce papier « matériau référent » qui présente l'avantage d'apporter une très bonne tenue mécanique mais qui sur le plan acoustique sont limités en largeur de bande des fréquences sauf à augmenter l'épaisseur (double layer) ce qui en général est contraire aux spécifications du cahier des charges. L'équipe acoustique de l'UTC a travaillé avec le groupe Safran dans le domaine de la propagation à modes élevés en conduit en présence d'écoulement représentative au mieux des conditions réelles. En effet dans le cadre du projet européen DUCAT en relation avec les principaux constructeurs et centres de recherche européens, un banc d'essai [1] et des outils de modélisation ont été développés. Depuis, ces moyens ont été mis en œuvre pour étudier des solutions alternatives au concept classique du liner considéré comme référent. Nous présentons le fruit synthétisé de ces travaux à savoir les résultats de trois solutions innovantes susceptibles d'être intégrées dans les parois des nacelles. Pour chacune d'elles les apports et inconvénients seront estimés par rapport au matériau référent.

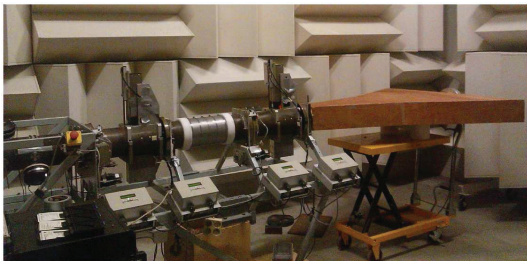


FIGURE 1 – Banc d'essai DUCAT.

2 Méthodologie de l'étude

Pour mener des études qui permettent d'évaluer l'efficacité d'un traitement acoustique, nous avons adopté la procédure suivante basée sur la connaissance de la matrice de diffusion qui caractérise de manière intrinsèque

(indépendamment des conditions en amont et en aval) le silencieux. Les différentes étapes de cette évaluation sont :

- Détermination de la matrice de diffusion S du tronçon traité.
- A partir de la connaissance de la base modale du vecteur excitation pour chaque fréquence contenue dans le spectre de la source, les pertes par transmission (TL) prenant en compte les effets réactifs et dissipatifs, sont déduites de S . Le calcul de l'atténuation permet en outre de mettre en évidence uniquement les effets de dissipation du silencieux. Afin de fournir un critère simple pour estimer l'efficacité d'un traitement, les pertes globales (Global TL) sont calculées en intégrant les puissances incidentes et transmises sur une bande de fréquence caractéristique de la source.

2.1 Matrice de diffusion d'un tronçon

La matrice de diffusion S de taille $2N \times 2N$ où N est le nombre de modes propagatifs associés aux indices (m, n) (où m et n sont respectivement les indices azimutaux et radiaux) caractérise un tronçon traité. Elle lie linéairement les pressions acoustiques entrantes dans le tronçon aux pressions acoustiques sortantes

$$\begin{pmatrix} A^{1-} \\ A^{2+} \end{pmatrix} = S \begin{pmatrix} A^{1+} \\ A^{2-} \end{pmatrix} \quad \text{avec} \quad S = \begin{pmatrix} S^{11} & S^{12} \\ S^{21} & S^{22} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

La matrice de diffusion est obtenue par un calcul validé expérimentalement sur le banc d'essai développé au cours du projet européen DUCAT. Le banc de section circulaire de rayon $R = 0.075\text{m}$ (voir Fig. 2) et la procédure de mesure de S sont exposés dans plusieurs références [2]. L'écoulement peut atteindre un nombre de Mach $M = 0.25$ pour une propagation à une fréquence adimensionnelle maximale de $ka = 8$ ce qui correspond environ à la coupure du mode $m = \pm 7$ et $n = 3$. Les sondes sont des couples de microphones pour des mesures sans écoulement et une sonde microphone-film chaud simple en présence d'écoulement.

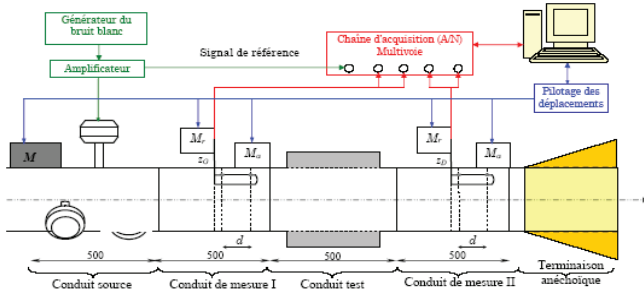


FIGURE 2 – Schéma descriptif du banc circulaire.

2.2 Pertes par transmission

Les pertes par transmission (Transmission Loss, TL) sont définies par

$$TL \text{ (dB)} = 10 \log_{10} \frac{W^{1+}}{W^{2+}} = 10 \log_{10} \frac{\sum' W_{mn}^{1+}}{\sum' W_{mn}^{2+}}, \quad (2)$$

où le symbole ($'$) signifie que la somme est limitée aux modes propagatifs. L'expression de la puissance modale incidente en présence d'un écoulement uniforme est donnée par Joseph *et al.* [3]

$$W_{mn}^{1+} = \frac{\kappa_{mn} |A_{mn}^{1+}|^2}{2\rho c} \quad \text{où} \quad \kappa_{mn} = \frac{\chi_{mn}(1-M^2)^2}{(1-\chi_{mn}M^2)^2} \quad (3)$$

et χ_{mn} est la quantité réelle

$$\chi_{mn} = \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha_{mn}}{k}\right)^2 (1-M^2)}. \quad (4)$$

La puissance transmise s'obtient de la même manière à partir des coefficients modaux transmis : $A^{2+} = S^{21}A^{1+}$. Dans le domaine de l'aéronautique on considère en général un spectre composé d'une part d'un bruit large bande associé aux instationnarités de l'écoulement et d'autre part des fréquences discrètes associées au passage des aubes (Blade Passing Frequency ou BPF). Dans le cas du large bande, on suppose en général, une base modale dite « équi-puissance » où les modes incidents sont décorrélés. La base modale associée aux fréquences discrètes est décrite par la relation classique de Tyler et Sofrin qui définit les nombres d'onde azimutaux : $m_{TS} = qB \pm lV$ où B est le nombre de pales, V le nombre de stators et q et l sont des entiers naturels. Afin de tenir compte de la décorrélation des modes incidents (à phase aléatoire), la quantité qui nous intéresse ici est la valeur moyenne de la puissance transmise, i.e. $W^{2+} = \langle W^{2+} \rangle$. Enfin les pertes globales (GTL) sont calculées en intégrant les puissances incidentes et transmise sur une bande de fréquence Δf :

$$GTL \text{ (dB)} = 10 \log_{10} \frac{\int_{\Delta f} W^{1+} df}{\int_{\Delta f} W^{2+} df}. \quad (5)$$

3 Trois concepts originaux de silencieux

La méthode décrite ci-dessus a été appliquée dans le cadre de collaborations industrielles pour d'une part tester deux concepts novateurs destinés à remplacer les liners usuellement utilisés dans les nacelles des moteurs Snecma et d'autre part pour concevoir un silencieux efficace pour l'échappement du moteur Turbomeca d'un hélicoptère à moindre coût et poids.

3.1 Tubes de Herschel-Quincke (HQ)

L'objectif est de tester des configurations de liners alternatives à la configuration classique plaque perforée-nid d'abeille à 1 (SDOF) ou 2 degrés de liberté (DDOF). Le principe, purement réactif, repose sur l'adjonction de tubes de dérivation disposés autour du conduit principal. Ce concept, introduit au milieu du 19^{ème} siècle [4, 5], est efficace autour de certaines fréquences discrètes. Dans le cas du mode plan, ces fréquences correspondent à deux types d'interférence destructive :

$$L_2 - L_1 = (m + 1/2)\lambda \quad \text{et} \quad L_2 + L_1 = n\lambda \quad (6)$$

où les longueurs mises en jeu sont respectivement la longueur du tube L_2 et la longueur de l'entre-axe L_1 . Le concept a été testé en laboratoire sur un réacteur de type Honeywell TFE 73 [6] dans les années 2000 montrant sa capacité à réduire de façon significative le bruit rayonné par l'entrée d'air de la soufflante : 8 dB aux fréquences de passage des aubes et jusqu'à 3 dB sur le bruit large bande sur la bande de fréquences $ka < 15$.



FIGURE 3 – Deux rangées de tubes HQ installés sur moteur (d'après [6]).

En collaboration avec la SNECMA (2005-2011), une modélisation analytique pour le calcul en 3D de la matrice de diffusion d'un silencieux avec tubes HQ disposés en paroi rigides [7] a permis de conduire une étude de l'influence des différents paramètres (longueur, diamètre, répartition angulaire..) sur l'efficacité de ce silencieux. En particulier, une amélioration de la performance d'un liner en série avec un tronçon avec HQ a été démontrée [8]. Les propriétés de ce dispositif intégré au sein d'un matériau classique (nid-abeille/plaque perforée) ont été déterminées par voie numérique en tenant compte des dimensions réelles de la nacelle et du spectre d'excitation [9]. La Fig. 4 montre qu'une réduction supplémentaire de 10 dB est permise à la première BPF (l'influence de l'écoulement n'est pas prise en compte ici).

Le concept n'a pas été retenu par la SNECMA car il n'est efficace que sur une bande de fréquences étroite. Une perspective de poursuite du travail aurait été de développer un système de contrôle actif de la fonction de transfert de chaque tube, un tel dispositif a d'ailleurs déjà été étudié. Toutefois sur la base de ces travaux, un brevet international [10] a été déposé en 2011 par SNECMA-UTC-CNRS dont le principe est schématisé sur la Figure 5. On a constaté que l'efficacité d'un silencieux atteignait un maximum après une propagation sur une longueur L_A . La conversion des premiers modes les moins atténués en modes d'ordre plus élevé par la présence des tubes HQ devrait permettre d'augmenter l'atténuation au-delà de L_A .

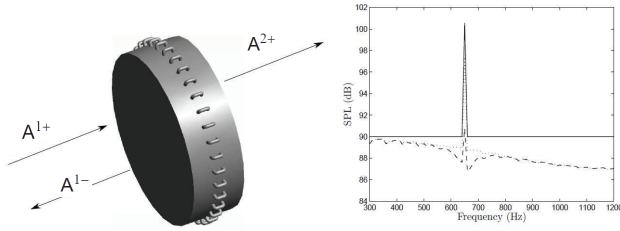


FIGURE 4 – Schéma d’un système intégré HQ-liner avec 36 tubes. (à gauche). Performances du système (à droite) : puissance incidente (straight), liner seul (dotted), HQ-liner (dashed).

Les règles de conversion sont rappelées ici [13] :

$$m^S = m^I \pm qN_T \quad (7)$$

où les indices azimutaux m^S et m^I correspondent respectivement aux modes diffractés et aux modes incidents, q est un entier et N_T est le nombre de tubes HQ disposés autour du conduit principal.

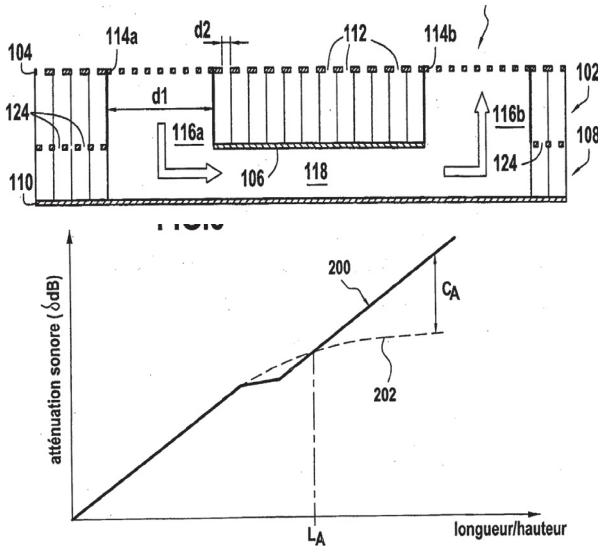


FIGURE 5 – Schémas de principe du brevet.

3.2 Matériaux poreux métalliques

Une alternative possible aux traitements traditionnels et susceptibles de satisfaire certaines contraintes thermiques et mécaniques repose sur l’utilisation de matériaux poreux, dit à réaction non localisée, qui permettent d’élargir le spectre d’atténuation. Le travail de thèse de Charles Chan (CIFRE UTC-SNECMA) fut consacré à la modélisation d’un traitement acoustique basé sur des matériaux poreux dans les conditions d’une manche d’entrée d’air de turboréacteur [11]. Un modèle semi-analytique a donc été développé pour le calcul de la perte par transmission d’un conduit cylindrique traité en paroi et soumis à un écoulement uniforme. Une étude paramétrique a ensuite été réalisée afin de cibler les caractéristiques du traitement optimal pour une configuration aéronautique donnée [12]. Les résultats de la Figure 6, issus de la modélisation, montrent que le traitement non localement réactif avec matériaux poreux offrent de meilleures performances en basse fréquence. Les comparaisons sont faites par rapport à un traitement DDOF

(Double Degree Of Freedom liner) et dans le cas d’un écoulement ‘négatif’ typique de l’entrée d’air. Le contenu modal du champ acoustique transmis regroupé par ‘mode group’ m (cad le groupe de modes propagatifs à m fixé) permet d’identifier le type de modes sensible au liner.

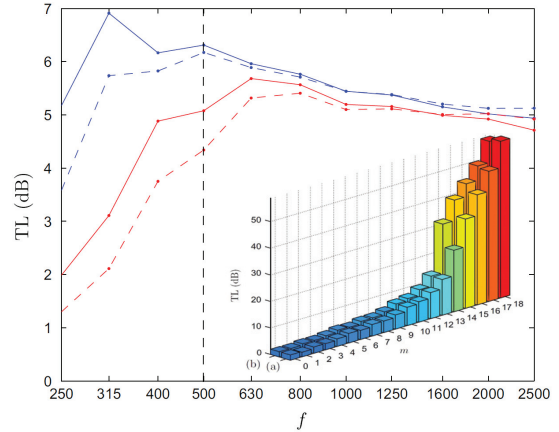


FIGURE 6 – Liner poreux métallique (continue) – DDOF liner (pointillé) pour $M = -0.3$ (rouge) et $M = -0.5$ (bleu), (d’après [12]). TL modal par ‘mode group’ m (a) poreux métallique et (b) DDOF liner.

Une campagne d’essais sur le banc DUCAT a été menée afin de confronter les simulations numériques. Sur la Figure 7 sont reportées les atténuations (en dB) :

$$Att \text{ (dB)} = 10 \log_{10} \left(\frac{W^{1+} - W^{1-}}{W^{2+}} \right) \quad (8)$$

expérimentales et calculées pour un écoulement positif à $M = 0.19$. La mesure est effectuée pour une configuration donnée correspondant à un point source localisé sur la paroi rigide du conduit amont. On peut noter l’effet des fréquences de coupure sur les simulations, les modes évanescents n’étant pas pris en compte ici.

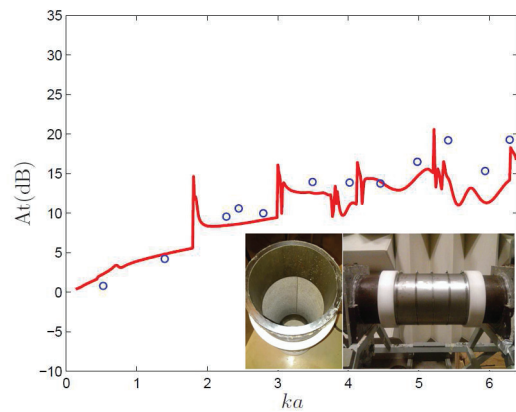


FIGURE 7 – Atténuation (en dB) à $M = 0.19$. Expérience (symbole) et simulation (en rouge).

3.3 Silencieux à multi-cavités

L’objectif du travail réalisé sur un projet européen Hexenor dans le cadre d’un programme Cleansky avec le soutien de Turboméca a été de déterminer la configuration du silencieux de longueur fixée composée sur sa périphérie

de cavités axiales et angulaires non localement réactives (voir Fig. 8) afin de réduire la puissance rayonnée par l'échappement du moteur dont le spectre large bande fourni par le constructeur est centré sur l'octave $ka = 3$. En l'absence d'information la base modale incidente est supposée équi-puissance et à phase aléatoire. Des

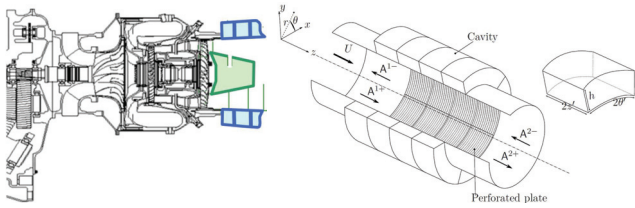


FIGURE 8 – Échappement moteur et modèle simplifié du silencieux.

confrontations essais-calculs ont été menés au laboratoire sur des tronçons tests afin de valider les simulations numériques et le choix des modèles d'impédances des plaques perforées et micro-perforées (Fig. 9). La Fig. 10 compare les pertes par

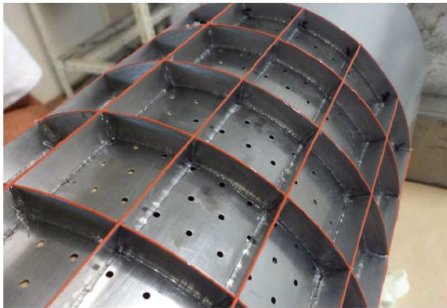


FIGURE 9 – Silencieux circulaire à multi-cavités testé.

transmission pour une configuration avec 4 segmentations selon la périphérie $N_\theta = 4$ et 4 selon l'axe du conduit $N_z = 4$. On peut noter un second pic de résonance au dessus

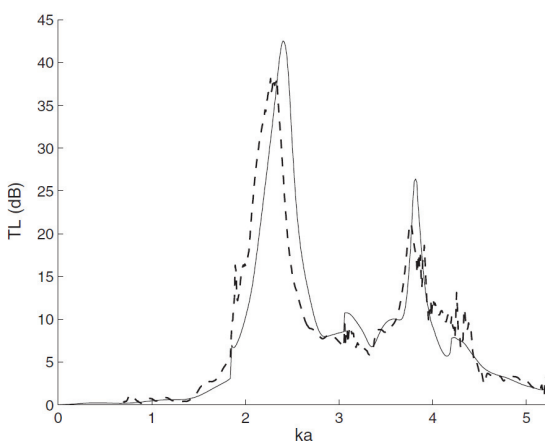


FIGURE 10 – Pertes par Transmission mesurée et calculées avec $N_\theta \times N_z = 16$ cavités, (d'après [14])

de la fréquence d'accord du traitement localement réactif traduisant les effets de diffraction et de résonance engendrés par les cavités. Ceci montre l'intérêt d'un tel dispositif afin d'élargir l'atténuation sur une large bande de fréquence. Pour déterminer la meilleure configuration qui inclue en plus de la performance acoustique le moindre coût et poids,

on détermine le GTL basé sur un spectre de la source large bande centré sur la fréquence adimensionnée $ka = 2.5$ fourni par Turboméca. A titre d'exemple, le Tableau 11 donne le GTL pour des configurations n'impliquant pas de segmentations angulaires ($N_\theta = 1$). Il est intéressant de distinguer dans cette étude la partie dissipée et réfléchi de la puissance acoustique incidente.

$N_\theta \times N_z$	GTL (dB)	Reflected (%)	Dissipated (%)
1 × 8	6.7	32	68
1 × 6	6.6	36	64
1 × 4	7.7	50	50
1 × 3	8.1	53	47
1 × 2	5.7	45	54
1 × 1	3.6	41	59

FIGURE 11 – GTL (dB) pour 8 configurations de silencieux à cavités multiples.

Au cours de ce travail, la procédure complète de conception d'un silencieux basée sur la détermination de sa matrice de diffusion a été mise œuvre. Le projet a été conclu par la réalisation de trois éléments de longueur différentes (Fig. 12) comportant 2 cavités axiales et une cavité azimutale.



FIGURE 12 – 3 silencieux retenus pour le projet.

4 Conclusion

La méthode basée sur la détermination de la matrice de diffusion d'un silencieux pour déterminer, en fonction des caractéristiques spatio-temporelles de la source, son efficacité à réduire le bruit a été présentée, déterminée et son intérêt démontré dans un processus permettant de choisir la meilleure solution. Trois concepts originaux de silencieux, susceptibles de constituer des alternatives au liner de référence pour réduire le bruit rayonné par l'entrée d'air d'un moteur d'aéronef ont été présentés. Les concepts présentés sont basés sur (i) les tubes de Herschel-Quincke (ii) l'utilisation des matériaux poreux métalliques et (iii) les silencieux à multi-cavités. L'efficacité apportée dépend largement de la configuration étudiée à savoir le spectre et la nature de la source acoustique, la géométrie du silencieux et la présence d'un écoulement. Les perspectives de ces travaux sont nombreuses, en particulier il serait intéressant de compléter la chaîne de calcul afin de pouvoir prédire l'Insertion Loss en prenant en compte l'impédance de rayonnement en sortie de conduit ainsi que celle de la source.

Références

- [1] R. Rademaker and al., Publishable synthesis report DUCAT, Report Ducat-NL-01-T5-9, NLR-TR-2001-170 (2001).
- [2] A. Sittel, J.M. Ville, F. Foucart, Multiload experimental procedure for measurement of acoustic scattering matrix of a duct discontinuity for higher order modes propagation conditions, *Journal of Acoustical Society of America* **120**, 2478-2490 (2006).
- [3] P. Joseph, C. Morfey, C. Lowis, Multi-mode sound transmission in ducts with flow, *J. Sound Vib.* **264**, 523-44 (2003).
- [4] J.F.W. Herschel, On the absorption of light by colored media, viewed in connection with the undulatory theory, *Philosophical Magazine and Journal of Science* **3**, 401-412 (1833).
- [5] G. Quincke, Ueber interferenzapparate für schallwellen, *Ann. Phys. Chem.* **128**, 177-192 (1866).
- [6] J.P. Smith, R.A. Burdisso, Experimental investigation of the Herschel-Quincke tube concept on the Honeywell TFE 73, Report 60 NASA/C211431, (2002).
- [7] B. Poirier, J.M. Ville, C. Maury, M.E. Kateb, Bicylindrical model of HQ tube duct system : theory and comparison with experiment and finite element method, *Journal of Acoustical Society of America* **126**, 1151-1162 (2009).
- [8] B. Poirier, C. Maury, J.M. Ville, The use of an array of Herschel-Quincke tubes to improve the efficiency of lined ducts, *Applied Acoustics* **7**, 78-88 (2011).
- [9] R. Maréchal, *Développement d'un modèle mixte numérique analytique pour l'optimisation d'un système HQ en conduit traité*. PhD. thesis, Université de Technologie de Compiègne (2011).
- [10] Patent WO 201 1/144842 A2, Inventeurs UTC/CNRS (J.M. Ville et B. Poirier) and SNECMA (J. Julliard, J. Mardjono, G. Riou), Nov. 2011.
- [11] C. Chan, *Outil d'aide à la conception d'un traitement acoustique basé sur des matériaux poreux pour la réduction du bruit de soufflante*. PhD. thesis, Université de Technologie de Compiègne (2015).
- [12] C. Chan, E. Perrey-Debain, J.M. Ville, Numerical determination of transmission losses of a turbofan inlet duct lined with porous materials, *Applied Acoustics* **117**, 86-93 (2017).
- [13] E. Perrey-Debain, R. Maréchal, J.M. Ville, Side-branch resonators modelling with Green's function methods, *Journal of Sound and Vibration* **333**, 4458-4472 (2016).
- [14] B. Ouédraogo, J.M. Ville, R. Maréchal, E. Perrey-Debain, Broadband noise reduction by circular multicavity mufflers operating in multimodal propagation conditions, *Applied Acoustics* **107**, 19-26 (2016).