

CFA/VISHNO 2016

Confrontation essai/calcul pour la validation de modèles d'impédance acoustique de traitements SDOF en présence d'écoulement

R. Baccouche, S. Moreau et M. Ben Tahar

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



LE MANS

Les traitements acoustiques passifs, aussi appelés liners, constituent la solution principale aux problèmes d'émissions sonores. Ils doivent souvent respecter plusieurs exigences, en particulier pour les turboréacteurs d'avions où les conditions d'utilisation sont extrêmes. Le traitement acoustique SDOF (Single Degree Of Freedom), composé d'un matériau mince apposé à des cavités d'air à fond rigide, est celui qui semble le mieux répondre à ces exigences. Les propriétés acoustiques du liner sont caractérisées par une grandeur physique homogène : l'impédance acoustique. Dans la littérature, les modèles caractérisant l'impédance des SDOF sont très répandus. Étant donnée l'importance des applications industrielles impliquant un milieu fluide en mouvement, certains de ces modèles prennent en considération l'influence de l'écoulement sur l'impédance du traitement. L'objectif de ce travail est de tester des modèles d'impédance acoustique. Pour cela, ces modèles sont implémentés dans un code de calcul numérique dont le résultat est confronté à celui expérimental. La configuration expérimentale étudiée correspond à un conduit cylindrique rigide comportant une partie traitée (dans notre cas, un traitement SDOF avec plaque perforée ou microperforée) débouchant dans une chambre anéchoïque. L'écoulement dans le conduit peut atteindre $M = 0.25$. Le code de calcul numérique repose sur un modèle éléments finis axisymétrique basé sur l'équation de Galbrun. La géométrie du conduit numérique est fidèle aux dimensions du conduit expérimental et la chambre anéchoïque est simulée par une couche PML (Perfectly Matched Layer) axisymétrique. Le modèle d'impédance acoustique est imposé sur les parois internes de la partie traitée du conduit.

1 Introduction

Les problèmes de nuisances sonores constituent un enjeu majeur dans de nombreux domaines de l'industrie. Il est alors devenu primordial pour les industriels de consentir à des efforts afin d'améliorer les performances acoustiques de leurs produits. Le domaine des transports, qui réunit des secteurs comme l'automobile, le ferroviaire, l'aéronautique ou même l'aérospatial, est particulièrement touché par cette tendance.

Les traitements acoustiques passifs, aussi appelés liners, constituent la solution principale aux problèmes d'émissions sonores. Ils doivent souvent respecter plusieurs exigences, en particulier pour les turboréacteurs d'avions où les conditions d'utilisation sont extrêmes. Le traitement acoustique SDOF (Single Degree Of Freedom), composé d'un matériau mince apposé à des cavités d'air à fond rigide, est celui qui semble le mieux répondre à ces exigences.

Les propriétés du liner sont caractérisées par une grandeur physique homogène : l'impédance acoustique qui dépend entre autres de sa géométrie et des phénomènes physiques qui s'y développent. Dans la littérature, des modèles semi-empiriques caractérisant l'impédance des SDOF sont très répandus. Étant donnée l'importance des applications industrielles impliquant un milieu fluide en mouvement (turboréacteurs, gaines de ventilation...), certains de ces modèles prennent en considération l'influence de l'écoulement sur l'impédance du traitement.

Dans cet article, certains de ces modèles d'impédance acoustique sont testés pour nos conditions expérimentales. Pour cela, une approche expérimentale et numérique pour les conduits avec traitement acoustique a été développée : les modèles sont implémentés dans un code de calcul numérique dont le résultat est confronté à la mesure. La configuration expérimentale étudiée correspond à un conduit cylindrique rigide comportant une partie traitée (dans notre cas, un traitement SDOF avec plaque perforée ou microperforée) débouchant dans une chambre anéchoïque. Dans ce conduit, l'écoulement peut atteindre le nombre de Mach $M = 0.25$. Le code de calcul numérique repose sur un modèle éléments finis axisymétrique basé sur l'équation de Galbrun, dont la géométrie est fidèle aux dimensions du conduit expérimental, et dans lequel la chambre anéchoïque est simulée par une couche PML (Perfectly Matched Layer) axisymétrique. Un modèle d'impédance acoustique est

imposé sur les parois internes de la partie traitée du conduit.

Dans une première partie, les modèles d'impédance acoustique correspondant à nos conditions expérimentales sont présentés. Ensuite, l'approche expérimentale et numérique permettant de tester les modèles d'impédance est développée. Enfin, l'approche est utilisée pour tester des modèles d'impédance acoustique de SDOF en propagation multimodale avec écoulement. Deux traitements SDOF sont testés : l'un muni d'une plaque perforée, et l'autre d'une plaque microperforée. Plusieurs vitesses d'écoulement ont été appliquées jusqu'à $M = 0.25$.

2 Impédance acoustique

Dans un premier temps, la définition de l'impédance acoustique d'un traitement SDOF est donnée. Différents modèles d'impédance de plaques perforées en présence d'un écoulement rasant sont ensuite présentés.

2.1 Impédance des traitements SDOF

Les traitements SDOF sont composés :

- d'une couche résistive composée d'une plaque perforée dont l'épaisseur est largement inférieure à celle de la longueur d'onde
- de cavités d'air de faibles diamètres par rapport à la longueur d'onde (voir Figure 1). Le fond de la cavité (en $y = 0$) est généralement rigide.

Dans l'hypothèse d'une réaction localisée, l'onde incidente ne peut se propager dans la cavité que suivant l'axe y . De plus, le nombre d'onde k dans la cavité est le même que celui de l'onde excitatrice, indépendamment de son angle d'incidence.

Les paramètres géométriques des traitements SDOF ont une forte influence sur leurs performances ainsi que sur la plage fréquentielle sur laquelle ils sont efficaces. Les paramètres de la plaque perforée sont son épaisseur t , le diamètre des trous d , le taux de perforation σ ($\sigma = n \frac{s}{S}$ avec n le nombre d'orifices sur une surface S et s la surface d'un seul orifice). Les paramètres de la cavité d'air sont sa section S_{cav} et sa profondeur L_{cav} .

L'impédance de surface du traitement complet z_t (couche résistive et cavités) est définie par

$$z_t = z_r + z_{cav} \quad (1)$$

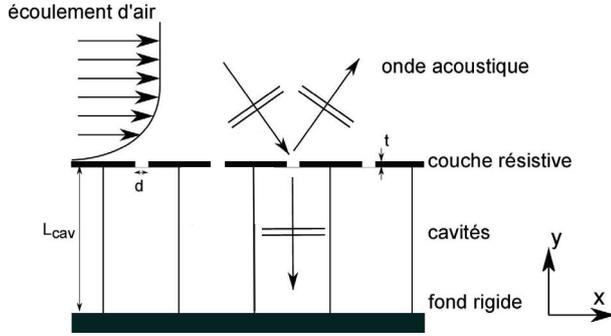


FIGURE 1 – Vue en coupe d'un traitement SDOF.

avec z_r l'impédance de la couche résistive et z_{cav} celle de la cavité. Dans l'hypothèse d'une réaction localisée et un fond de cavité rigide

$$z_t = z_r + i \cot(kL_{cav}). \quad (2)$$

Pour connaître l'impédance d'un traitement SDOF, il faut donc disposer de modèles d'impédance acoustique de la couche résistive composée d'une plaque perforée.

2.2 Modèles d'impédance acoustique de plaques perforées en présence d'écoulement

L'impédance acoustique d'un SDOF dépend de celle de sa plaque perforée. Des modèles d'impédance acoustique de plaques perforées ($d > t$) et microperforées ($d < t$) sont présentés dans cette section.

2.2.1 Modèle de Guess (1974)

Guess [1] propose un modèle d'impédance acoustique valide pour les plaques perforées pour les basses et les hautes fréquences

$$z_{Guess, f < 100\text{Hz}} = \left[\frac{32\nu(t+d)}{\sigma c_0 d^2} + \frac{1}{8\sigma} (kd)^2 + \frac{1-\sigma^2}{\sigma} M_a + K \frac{1-\sigma^2}{\sigma} M \right] - i \left[\frac{4kt}{3\sigma} + \frac{k}{\sigma} \delta \right] \quad (3)$$

$$z_{Guess, f > 1000\text{Hz}} = \left[\frac{\sqrt{8\nu\omega}(t+d)}{\sigma c_0 d} + \frac{1}{8\sigma} (kd)^2 + \frac{1-\sigma^2}{\sigma} M_a + K \frac{1-\sigma^2}{\sigma} M \right] - i \left[\frac{kt}{\sigma} + \frac{\sqrt{8\nu\omega}(t+d)}{\sigma c_0 d} + \frac{k}{\sigma} \delta \right] \quad (4)$$

avec ν la viscosité cinématique du fluide, M_a la vitesse de la particule d'air dans l'orifice en nombre de Mach, K un coefficient empirique basé sur la théorie des couches limites, M la vitesse de l'écoulement rasant moyen en nombre de Mach et δ la correction de longueur de l'orifice au niveau de la réactance.

2.2.2 Modèle d'Allam (2008)

Allam et Abom [2] proposent un modèle pour les plaques microperforées

$$z_{Allam, 2008} = \left[\frac{\sqrt{8\nu\omega}(t+d)}{\sigma c_0 d C_d} + \frac{K}{\sigma} M \right] - i \left[\frac{k}{\sigma C_d} (t+\delta) \right] \quad (5)$$

avec C_d le coefficient de perte de charge.

2.2.3 Modèle de Yu (2008)

Yu *et al.* [3] proposent un modèle d'impédance spécialement développé pour l'aéronautique pour des plaques perforées et microperforées

$$z_{Yu} = \left[\text{Re} \left(\frac{ik}{\sigma} \left(1 - \frac{4J_1(k_s d/2)}{k_s d J_0(k_s d/2)} \right)^{-1} (t + d\delta_r) \right) + \frac{1.336541}{2C_d^2} \frac{1-\sigma^2}{\sigma^2} M_a + \frac{1}{\sigma(2+1.256\delta^*/d)} M \right] - i \left[\text{Im} \left(\frac{ik}{\sigma} \left(1 - \frac{4J_1(k_s d/2)}{k_s d J_0(k_s d/2)} \right)^{-1} (t + d\delta_\chi) \right) + S_m M_a \right] \quad (6)$$

avec k_s le nombre de Stokes, J_0 et J_1 les fonctions de Bessel de première espèce d'ordre 0 et 1, δ_r et δ_χ des corrections de longueur de l'orifice, δ^* l'épaisseur de déplacement de la couche limite et S_m le coefficient de réactance de masse non linéaire.

2.2.4 Modèle de Cobo (2010)

Le modèle de Cobo *et al.* [4] est applicable aux plaques microperforées. Il est similaire à celui d'Allam 2008 [2], mais avec des modifications au niveau de la correction de longueur

$$z_{Cobo} = \left[\frac{\sqrt{8\nu\omega}}{4c_0\sigma} + \frac{K}{\sigma} M \right] - i \left[\frac{kt}{\sigma} \left(1 - \frac{4J_1(k_s d/2)}{k_s d J_0(k_s d/2)} \right)^{-1} + \frac{k}{\rho_0\sigma} \delta \right]. \quad (7)$$

Il a été expérimenté sur un système à double plaque perforée associé à un milieu poreux.

2.2.5 Modèle d'Allam (2011)

Allam et Abom [5] proposent un modèle plus complet que celui proposé en 2008 pour les plaques microperforées

$$z_{Allam, 2011} = \left[\text{Re} \left(\frac{ikt}{\sigma} \left(1 - \frac{4J_1(k_s d/2)}{k_s d J_0(k_s d/2)} \right)^{-1} \right) \frac{\alpha \sqrt{2\nu\omega}}{\sigma c_0} + \frac{1}{\sigma} M_a + \frac{K}{\sigma} M \right] - i \left[\text{Im} \left(\frac{ikt}{\sigma} \left(1 - \frac{4J_1(k_s d/2)}{k_s d J_0(k_s d/2)} \right)^{-1} \right) + \frac{k}{\sigma} \delta \right]. \quad (8)$$

2.2.6 Plages de validation expérimentales utilisées par les auteurs

Le Tableau 1 résume les plages de validation expérimentales utilisées par les auteurs.

3 Approche expérimentale et numérique pour un conduit traité avec écoulement

3.1 Description du banc et du traitement du signal associé

Les mesures expérimentales sont réalisées sur un banc aéroacoustique du laboratoire Roberval développé dans le cadre du programme européen DUCAT [6]. Le banc est situé

TABLEAU 1 – Synthèse des plages de validation expérimentale de chaque modèle.

Modèle	Guess	Yu	Cobo	Allam
Épaisseur de la plaque t (mm)	1	0.8 ; 1.0 ; 1.2 ; 1.3	0.5	1
Diamètre des trous d (mm)	2.5	1.0 ; 1.1 ; 1.2	0.3 ; 0.5	1
Taux de perforation σ (%)	20 ; 25	7.7 ; 7.9 ; 8.2 ; 11.8	23 ; 30	0.5 ; 2
Écoulement M (Mach)	0 ; 0.5	0.2 ; 0.3 ; 0.45 ; 0.5	0 ; 0.1	0 ; 0.15
Diamètre du conduit (m)	?	0.05 (carré)	0.2 (carré)	0.057 (cylindrique)
Fréquence de validation (Hz)	?	500 ; 3500	0 ; 5145	0 ; 1100
Coupure du premier mode (Hz)	?	3400	850	3493

dans une chambre anéchoïque et est constitué d'un conduit cylindrique en acier d'une épaisseur de 0.015 m et d'un diamètre interne de 0.148 m avec les éléments suivants (voir Figure 2) :

- un ventilateur centrifuge permettant de générer un écoulement allant jusqu'à Mach $M = 0.25$ (l'écoulement et l'onde acoustique ont le même sens de propagation).
- une chambre de compression avec une bande passante allant de 200 à 9000 Hz et un niveau maximal de pression sonore (SPL max) de 136 dB à 150 W ; la source est excitée par un signal multi-sinus (79 sinus allant de 256 à 4992 Hz avec un pas de 64 Hz) via un amplificateur de puissance.
- un tronçon test dans lequel un traitement acoustique peut être appliqué ; Le traitement acoustique testé à une longueur de 0.3m et est constituée d'une plaque perforée en aluminium de 0.5 mm d'épaisseur sur laquelle sont disposées 8 x 16 cavités rectangulaires (38 mm x 29 mm) de 8 mm de profondeur. Le tout est enfermé par deux demi-cylindres en aluminium faisant office de fond rigide pour les cavités. Cet empilement, supposé localement réactif (du moins, jusqu'à la fréquence de coupure de la cavité vers 4500 Hz) est axisymétrique et permet de simuler un matériau de type SDOF. Deux tronçons tests sont disponibles avec des plaques perforées de géométrie différente dont les caractéristiques sont données dans le Tableau 2.
- une sonde de pression en amont (sur la section S_1) et aval (sur la section S_2) du traitement. Une sonde réalise des mesures locales de pression à l'aide d'un microphone muni d'une ogive. Chaque sonde se déplace sur 240 points (16 positions azimutales x 15 positions radiales). L'exploration de la sonde à travers le conduit permet d'obtenir le champ de pression dans la section de mesure et cette discrétisation permet d'effectuer une décomposition modale des modes azimutaux allant jusqu'à $m = \pm 7$.
- une terminaison rigide de type pavillon exponentiel.

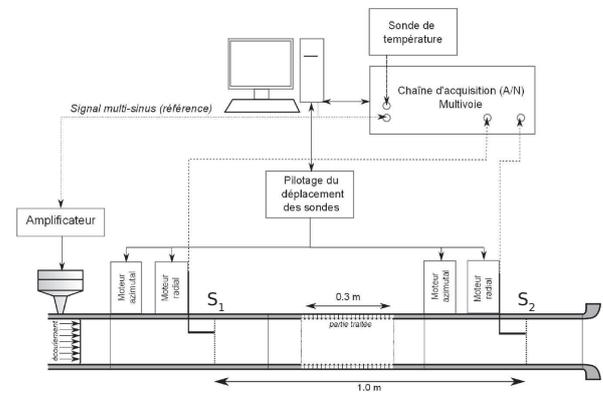


FIGURE 2 – Schéma du dispositif expérimental.

Type de plaque	perforée	microperforée
Diamètre des trous (mm)	1.89	0.30
Taux de perforation (%)	1.76	1.16

TABLEAU 2 – Paramètres géométriques des plaques perforées.

La pression au microphone j (pour $j = [1; 2]$) est donnée par

$$P_{M_j}(r, \theta, f) = \frac{G_{\text{réf}, M_j}(r, \theta, f)}{G_{\text{réf}, \text{réf}}(f)} \cdot \frac{|S_{\text{réf}}(f)|}{H_{M_j}} \quad (9)$$

avec $G_{\text{réf}, M_j}(r, \theta, f) = S_{\text{réf}}^*(f) \cdot S_{M_j}(r, \theta, f)$ l'inter-spectre entre le signal de référence $S_{\text{réf}}(f)$ (signal donné au générateur) et celui du microphone $S_{M_j}(r, \theta, f)$, $G_{\text{réf}, \text{réf}}(f) = S_{\text{réf}}^*(f) \cdot S_{\text{réf}}(f)$ l'auto-spectre du signal de référence, H_{M_j} la fonction de transfert d'étalonnage du microphone j en V/Pa et $|S_{\text{réf}}(f)|$ le module du signal de référence en V. En fin de traitement, l'utilisateur obtient donc la valeur de la pression acoustique (complexe) en Pa mesurée sur les 240 points de chaque section pour 79 fréquences allant de 256 à 4992 Hz avec un pas de 64 Hz.

3.2 Description du modèle numérique FEM-PML

La propagation des perturbations acoustiques linéaires dans un milieu continu, non visqueux et adiabatique peut être exprimée par une description mixte Eulérienne-Lagrangienne. Cette description consiste à considérer la perturbation Lagrangienne de quantités physiques (associée à la particule fluide) exprimées en termes de variables Eulériennes relative à l'écoulement moyen stationnaire. L'application des règles de perturbation liées à la description mixte sur les équations d'Euler conduit à l'équation de Galbrun. Afin de résoudre l'équation de Galbrun par la méthode des éléments finis, une formulation variationnelle mixte en pression-déplacement est utilisée pour éviter les solutions parasites [7]. Elle a été testée avec succès en régime harmonique et transitoire [8]. La méthode numérique développée est basée sur la formulation éléments finis mixte en pression-déplacement basé sur l'équation de Galbrun, et sur la PML axisymétrique.

La géométrie du modèle reproduit le dispositif expérimental avec une *section d'entrée* du conduit, prise comme source acoustique, correspondant à la section de mesure S_1 du banc expérimental. Après décomposition azimutale, la pression totale (incidente+réfléchie) mesurée expérimentalement en S_1 est imposée sur cette *section d'entrée* numérique. La *section de sortie*, correspondant à la section de mesure S_2 , sert à la corrélation essais/calculs. L'écoulement porteur est calculé numériquement en utilisant le logiciel CFD *Fluent*.

La PML introduite permet de simuler les parois de la chambre anéchoïque. La longueur de la PML et son paramètre d'absorption ont été optimisés afin d'éliminer au mieux les réflexions sur la bande de fréquence considérée.

3.3 Corrélation des résultats expérimentaux et numériques

Le protocole du calcul numérique et de la confrontation essais/calculs est :

- Décomposition modale azimutale par transformée de Fourier spatiale de la pression acoustique expérimentale sur la section d'entrée S_1

$$p_m(r, z_1, f) = \frac{1}{2\pi} \langle p(r, \theta, z_1, f) | e^{im\theta} \rangle \quad (10)$$

avec m le mode azimutal et $\langle \cdot | \cdot \rangle$ le produit scalaire.

- Implémentation des profils de pression sur les nœuds de la section d'entrée S_1 du conduit numérique et calcul pour chaque mode m propagatif.
- Recomposition de la pression acoustique numérique totale sur la section S_2 à partir des profils radiaux

$$p(r, \theta, z_2, f) = \sum_{m=-7}^{+7} p_m(r, z_2, f) e^{im\theta}. \quad (11)$$

- Comparaison des résultats expérimentaux et numériques par comparaison du niveau d'énergie totale de la pression acoustique [6]

$$L_p(z_2, f) = 10 \log \left(\frac{E_T^p(z_2, f)}{S \cdot (2 \cdot 10^{-5})^2} \right) \quad (12)$$

avec

$$E_T^p(z_2, f) = \int_0^{2\pi} \int_0^R |p(r, \theta, z_2, f)|^2 r dr d\theta, \quad (13)$$

S l'aire de la section interne du conduit et R le rayon du conduit.

3.4 Validation de l'approche sur un tronçon rigide non traité

Une approche expérimentale / numérique pour les conduits avec traitement acoustique a été présentée. La validation de l'approche a été réalisé sur un tronçon rigide (non traité) sans écoulement, puis avec un écoulement de $M = 0.25$. La Figure 3 présente les résultats expérimentaux et numériques obtenus pour ce tronçon test rigide. Les lignes verticales signalent les fréquences de coupure des modes acoustiques.

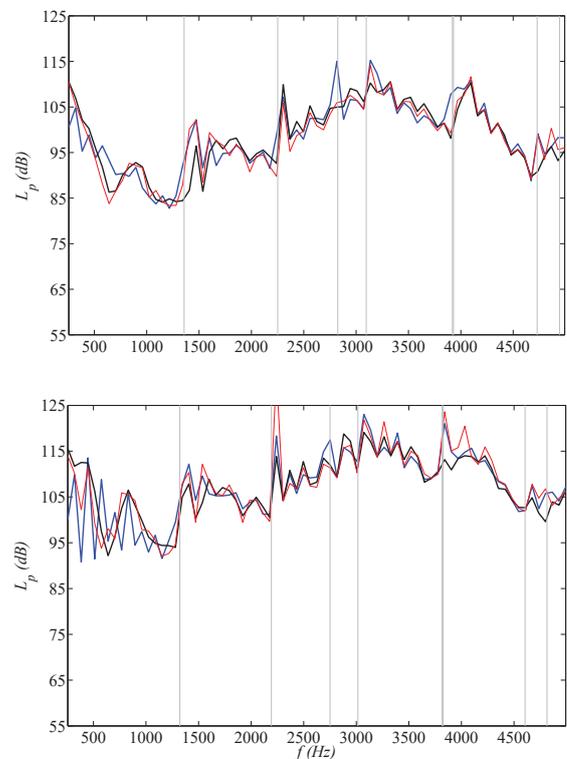


FIGURE 3 – Niveau d'énergie totale de la pression acoustique pour un tronçon test rigide sans écoulement (haut) et avec un écoulement $M = 0.25$ (bas) : mesure expérimentale sur la section : S_1 (bleu); S_2 (noir); calcul numérique sur la section S_2 (rouge).

Proche des fréquences de coupure, des écarts importants peuvent apparaître car la mesure n'est pas représentative en raison des différents phénomènes physiques qui surviennent (formation du mode, longueur d'onde infinie...). De plus, les imperfections dans le conduit expérimental, ainsi que les phénomènes de vibration des parois et de fuite acoustique (non pris en compte par le modèle numérique) peuvent expliquer certains écarts de résultats. Lorsque la fréquence s'éloigne de la fréquence de coupure des modes, les calculs réalisés montrent un bon accord entre les niveaux d'énergie expérimentaux et numériques sur la section S_2 avec des écarts d'environ 2 dB. Cette méthode est donc un moyen

simple et efficace pour tester des modèles d'impédance de traitements acoustiques.

4 Résultats

L'approche développée précédemment est utilisée pour tester des modèles d'impédance acoustique de SDOF en propagation multimodale avec écoulement. Deux traitements SDOF sont testés : l'un muni d'une plaque perforée et l'autre d'une plaque microperforée. Plusieurs vitesses d'écoulement ont été appliquées jusqu'à $M = 0.25$.

4.1 SDOF avec plaque perforée

Parmi tous les modèles d'impédance acoustique présentés, ceux de Yu et de Guess sont adaptés à l'étude de plaques perforées. Les caractéristiques du traitement SDOF testé avec une plaque perforée sont données à la section 3.1.

Les modèles d'impédance sont introduits dans le code de calcul modélisant le banc expérimental et les résultats numériques sont confrontés aux mesures. La Figure 4 présente les résultats expérimentaux et numériques obtenus pour le tronçon test composé d'un SDOF avec une plaque perforée.

En comparant les résultats expérimentaux en amont (section S_1) et en aval (section S_2) du SDOF, sa plage d'efficacité se situe sur l'intervalle $1200\text{Hz} < f < 3400\text{Hz}$. Au-delà de 4600 Hz, la réaction localisée n'est plus assurée, d'où l'écart de niveau entre les deux sections de mesure.

Sans écoulement, hors de la plage d'efficacité du SDOF, les niveaux simulés numériquement sur la section S_2 sont très similaires à ceux mesurés, quel que soit le modèle d'impédance. Sur la plage d'efficacité du SDOF, le modèle de Yu s'accorde mieux à la mesure que celui de Guess avec un écart de l'ordre de 2 dB. La différence d'amplitude vers 1600 Hz s'explique par des pressions très faibles dont le moindre écart de valeur est amplifié par la représentation en décibel. La qualité des résultats atteste de la validité des modèles d'impédance sans écoulement, malgré les différences de porosité entre le traitement employé et ceux utilisés par les auteurs.

Pour $M = 0.1$, la simulation donne des résultats différents de ceux issus de la mesure (avec un écart de l'ordre de 5 dB) ce qui révèle une erreur entre l'impédance réelle du liner et celle prédite par les modèles. Pour $M = 0.25$, en dessous de 3800 Hz, les niveaux calculés s'accordent bien aux mesures expérimentales avec un écart de l'ordre de 1 dB. Au-delà, la simulation sous-estime la mesure d'environ 4 dB. Ainsi, les modèles d'impédance convergent vers l'impédance réelle du traitement lorsque la vitesse d'écoulement augmente. Les différences observées pourraient être dues au fait que la vitesse d'écoulement appliquée ne soit pas suffisamment élevée comparativement à la plage de validation utilisée par les auteurs de ces modèles ($M_{\text{Guess}} = 0.5$ et $M_{\text{Yu}} = 0.2; 0.3; 0.45; 0.5$).

Il est intéressant de noter que bien que la plupart des modèles d'impédance acoustique ne soient validés qu'en onde plane par leurs auteurs, ils conviennent aussi en condition multimodale avec l'hypothèse d'une réaction localisée [9].

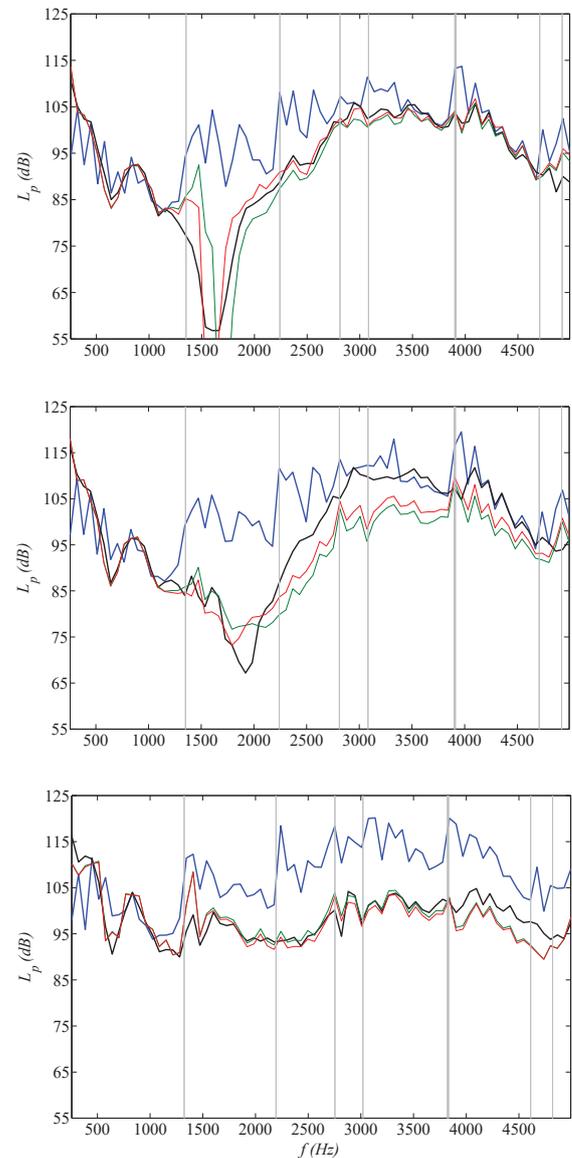


FIGURE 4 – Niveau d'énergie totale de la pression acoustique pour un tronçon test SDOF avec plaque perforée sans écoulement (haut), un écoulement $M_0 = 0.10$ (milieu) et $M_0 = 0.25$ (bas) : mesure expérimentale sur la section : S_1 (bleu) ; S_2 (noir) ; calcul numérique sur la section S_2 avec le modèle de : Yu (rouge) ; Guess (vert).

4.2 SDOF avec plaque microperforée

Dans cette section, les modèles d'impédance acoustique adaptés aux plaques microperforées, à savoir ceux de Yu, de Cobo et d'Allam (2008 et 2011), sont testés. Les caractéristiques du traitement SDOF avec une plaque microperforée sont données à la section 3.1. L'application de ces modèles d'impédance au code de calcul pour le tronçon test SDOF avec une plaque microperforée donne les résultats de la Figure 5. La plage d'efficacité du liner commence à 1000 Hz.

Sans écoulement, la simulation numérique et les résultats expérimentaux ont un écart de niveau de l'ordre de 2 dB pour le modèle de Yu et de 4 dB pour les autres modèles. Vers 2200 Hz, de forts écarts d'amplitude apparaissent qui peuvent s'expliquer en partie par des pressions très basses dont la moindre erreur est amplifiée en représentation en dB.

Pour $M = 0.1$, l'ordre de grandeur de l'écart entre la

simulation et la mesure varie selon les modèles allant de 1 dB pour le modèle de Yu à 4 dB pour le modèle de Cobo. Pour $M = 0.25$, la simulation montre de bons résultats quel que soit le modèle utilisé avec des écarts de l'ordre de 2 dB. Comme pour le cas d'un SDOF avec plaque perforée, les modèles d'impédance convergent vers l'impédance réelle du traitement lorsque la vitesse d'écoulement augmente.

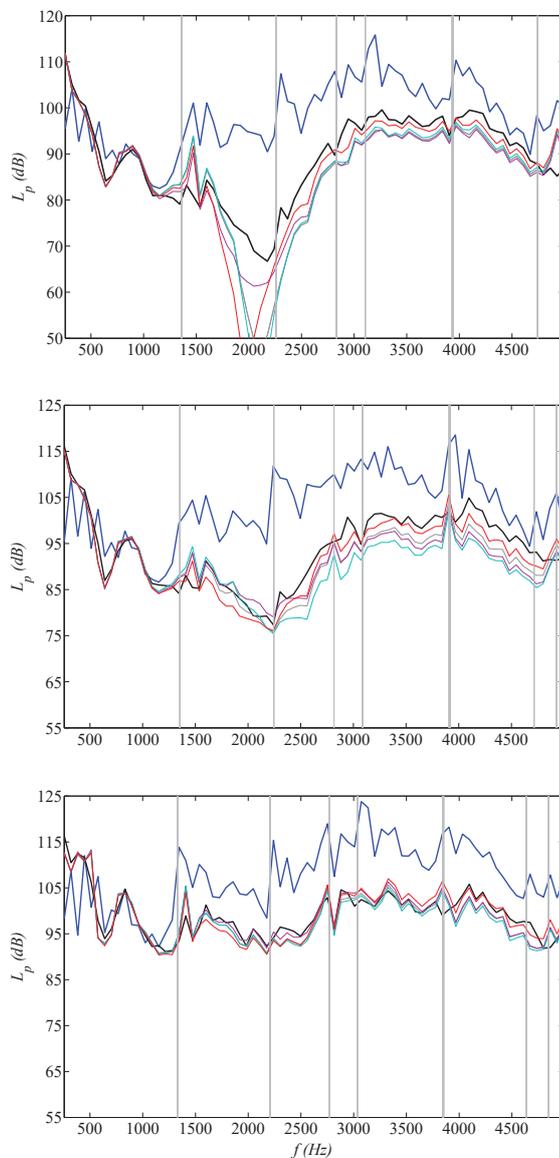


FIGURE 5 – Niveau d'énergie totale de la pression acoustique pour un tronçon test SDOF avec plaque microperforée sans écoulement (haut), un écoulement $M_0 = 0.1$ (milieu) et $M = 0.25$ (bas) : mesure expérimentale sur la section S_1 (bleu) ; S_2 (noir) ; calcul numérique sur la section S_2 avec le modèle de : Yu (rouge) ; Cobo (cyan) ; Allam 2008 (gris) ; Allam 2011 (magenta).

5 Conclusion

Une approche expérimentale / numérique pour les conduits avec traitement acoustique a été présentée. Plusieurs modèles d'impédance acoustique tenant compte de l'écoulement ont été ensuite testés en condition multimodale sur deux types de traitement SDOF : un avec plaque perforée et un avec plaque microperforée. Concernant le SDOF avec

plaque perforée sans écoulement, les résultats obtenus avec les modèles de Yu et de Guess sont en bon accord avec les mesures expérimentales avec l'hypothèse d'une réaction localisée. En présence d'écoulement ($M = 0.1$ et $M = 0.25$), des écarts apparaissent mais diminuent lorsque la vitesse d'écoulement augmente. Cet écart est attribué au fait que la vitesse d'écoulement soit inférieure à celles utilisées par les auteurs des modèles pour leur validation. Pour le SDOF avec plaque microperforée, les calculs issus des modèles de Yu donnent des résultats proches des mesures expérimentales. Les résultats des modèles de Cobo et Allam donnent des écarts significatifs par rapport aux résultats expérimentaux pour $M = 0$ et $M = 0.1$ et ces écarts sont négligeables à $M = 0.25$.

Références

- [1] A. W. Guess, Calculation of perforated plate liner parameters from specified acoustic resistance and reactance, *J. Sound Vib.* **40(1)**, 119-137 (1974)
- [2] S. Allam et M. Abom, Experimental characterization of acoustic liners with extended reaction, *14th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference* (2008)
- [3] J. Yu, M. Ruiz et H. W. Kwan, Validation of goodrich perforate liner impedance model using nasa langley test data, *14th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference* (2008)
- [4] P. Cobo, H. Ruiz et J. Alvarez, Double-layer microperforated panel/porous absorber as liner for anechoic closing of the test section in wind tunnels, *Acta Acust. United Ac.* **96**, 914-922 (2010)
- [5] S. Allam et M. Abom, A new type of muffler based on microperforated tubes, *J. Vib. Acoust.* **133(3)** (2011)
- [6] J. M. Ville et F. Foucart, Experimental setup for measurement of acoustic power dissipation in lined ducts for higher order modes propagation with air mean-flow conditions, *J. Acoust. Soc. Am.* **114(4)**, 1742-1748 (2003)
- [7] F. Treysède, G. Gabard et M. B. Tahar, A mixed finite element method for acoustic wave propagation in moving fluids based on an Eulerian-Lagrangian description, *J. Acoust. Soc. Am.* **113**, 705-716, (2003)
- [8] X. Feng, M. B. Tahar et R. Baccouche, The aeroacoustic Galbrun equation in the time domain with perfectly matched layer boundary conditions, *J. Acoust. Soc. Am.* **139(1)** (2016)
- [9] M. Taktak, J. M. Ville, M. Haddar, G. Gabard et F. Foucart, An indirect method for the characterization of locally reacting liners, *J. Acoust. Soc. Am.* **127(6)**, 3548-3559 (2010)