

Des dispositifs de type silencieux ou filtres sont couramment employés dans l'industrie pour réduire la propagation du bruit dans les guides d'ondes. La qualification acoustique de ces dispositifs s'effectue en général sur des bancs de mesure de matrice de transfert, équipés de doublets microphoniques. L'un des inconvénients de cette technique usuelle est qu'elle requiert de bien gérer l'adaptation mécanique entre le conduit du banc de test et le dispositif à qualifier. Il est ainsi indispensable que la section et la forme du conduit de mesure soient les plus proches possible de celles du dispositif à tester. Cette contrainte complexifie la réalisation de l'essai et peut être source d'imprécision si l'adaptation n'est pas bien faite. Lorsque la procédure de qualification ne nécessite pas de soumettre le dispositif à un écoulement d'air, une technique de mesure alternative permet de s'affranchir du problème de l'adaptation mécanique. Cette technique utilise une tête d'impédance acoustique développée par le CTTM et le LAUM. Nous rappelons dans un premier temps le principe de cette technique alternative. Dans un second temps, nous présentons des résultats expérimentaux qui mettent en avant les avantages et inconvénients de chacune des approches.

1 Introduction

La qualification acoustique de guides d'ondes intervient dans de nombreuses problématiques, que ce soit pour des applications industrielles ou pour de la recherche académique. Plusieurs applications sont concernées, telles que la qualification de silencieux, la caractérisation de matériaux poroélastiques ou l'acoustique musicale. De nombreuses études décrivent les méthodes usuellement employées [1, 2, 3], qui sont généralement dérivées de la technique du doublet microphonique, l'augmentation du nombre de microphones permettant d'élargir la plage de fréquence accessible. Lorsque l'objet à qualifier n'est pas symétrique, sa caractérisation nécessite une mesure en deux temps (multi sources ou multi charges) ou l'utilisation d'une terminaison anéchoïque.

Ces méthodes de mesure en conduit sont, de nos jours, relativement courantes. Elles possèdent cependant quelques inconvénients. Le premier concerne la phase de d'étalonnage. Pour garantir une bonne précision, notamment aux basses fréquences, il est nécessaire de procéder à une calibration relative des capteurs : dans la version la plus courante à quatre microphones, ceci conduit à effectuer au moins trois mesures de fonctions de transfert impliquant une permutation de l'ensemble des capteurs. S'ajoute de fait le risque d'un mauvais positionnement des microphones qui fausserait la calibration du banc. Le second inconvénient concerne le montage de l'objet à mesurer. Dans le cas d'une caractérisation d'un matériau poroélastique, il n'y a pas de contrainte puisque ce dernier est découpé aux dimensions du conduit utilisé. En revanche, lorsqu'il s'agit de mesurer un silencieux, il est rare que les diamètres d'entrée et de sortie soient exactement les mêmes que ceux du conduit du banc d'essais. Lorsque la différence de diamètre est faible, le raccordement à l'aide d'un tuyau souple peut être effectué sans entraîner trop d'erreur sur le résultat final. Dans le cas contraire, il faut faire réaliser une pièce d'adaptation et corriger éventuellement son effet sur le résultat des mesures.

Nous proposons ici une alternative qui utilise un capteur d'impédance développé par le LAUM et le CTTM [4, 5]. Par rapport à la méthode usuelle à quatre microphones, la technique de mesure que nous présentons utilise une phase de calibration simple et rapide. De plus, elle limite les inconvénients associés à l'adaptation des objets à mesurer.

2 Description de la méthode

2.1 Principe général

Le principe général de la méthode de mesure exposée est décrit en figure 1. Il y a en tout trois microphones : deux équipant le capteur d'impédance et un troisième, monté affleurant sur une paroi rigide.

Le protocole de mesure comprend trois phases. La première revient à effectuer une calibration relative des microphones. Le conduit de sortie du capteur d'impédance est fermé par la paroi rigide contenant le microphone 3. U_1 , U_2 , et U_3 étant respectivement les tensions fournies par les microphones 1, 2 et 3, les grandeurs $H_{12}=(U_2/U_1)$ et $H_{32}=(U_2/U_3)$ sont mesurées.

L'une des extrémités de l'objet à caractériser est ensuite plaquée sur le plan de mesure du capteur d'impédance. L'autre extrémité est fermée par la paroi rigide contenant le microphone 3. Les fonctions de transfert H_{12} et H_{32} sont à nouveau mesurées. La troisième phase nécessite de retourner l'objet à qualifier avant de procéder à nouveau à la mesure des deux fonctions de transfert. Pour ces deux étapes, il convient bien entendu de soigner l'étanchéité au niveau des jonctions.

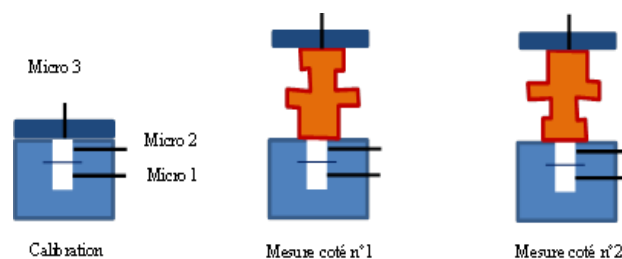


Figure 1: Principe de la mesure

2.2 Obtention de la matrice impédance

Avec les conventions de la figure 2 les grandeurs acoustiques sont définies comme suit :

- P_1 et P_2 sont les pressions acoustiques aux entrées de l'objet à mesurer,
- Q_1 et Q_2 sont les débits acoustiques entrants,
- S_1 et S_2 sont les sections aux entrées.

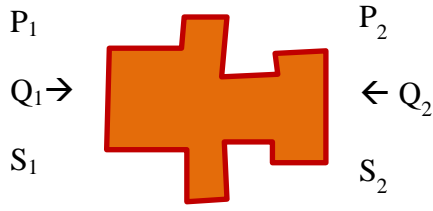


Figure 2: grandeurs acoustiques associées à la matrice d'impédance

La matrice d'impédance du guide d'onde est définie par la relation suivante :

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

La première mesure étant réalisée avec une condition de débit acoustique Q_2 nul, on obtient :

$$\begin{cases} Z_{11} = P_1^1 / Q_1^1 \\ Z_{21} = Z_{11} \times P_2^1 / P_1^1 \end{cases} \quad (2)$$

La seconde mesure, réalisée avec une condition de débit acoustique Q_1 nul, donne les deux autres coefficients de la matrice d'impédance :

$$\begin{cases} Z_{22} = P_2^2 / Q_2^2 \\ Z_{12} = Z_{22} \times P_1^2 / P_2^2 \end{cases} \quad (3)$$

Les deux impédances d'entrée du guide d'onde Z_{11} et Z_{22} sont fournies directement par le capteur d'impédance (voir figure 3 et [4] pour plus de détail sur le principe du capteur). De même, en prenant en compte la géométrie du capteur, les deux impédances Z_{21} et Z_{12} peuvent ensuite être obtenues à partir des grandeurs mesurées. Les relations suivantes rappellent l'expression des impédances réduites :

$$z_{ii} = \frac{Z_{ii}}{Z_{ci}} = \frac{S_i}{S_c} \frac{[H_{12}^i / H_{12}^c] / \delta - \beta}{1 - [H_{12}^i / H_{12}^c]} - jkl_{corr-i} \quad (4)$$

et

$$z_{ji} = \frac{Z_{ji}}{Z_{ci}} = \frac{Z_{ii} + jkl_{corr-i} + \beta \frac{S_i}{S_c}}{H_{32}^i / H_{32}^c} \quad (5)$$

avec i et $j=1,2$

où :

- H_{12}^i et H_{12}^c sont les fonctions de transfert H_{12} obtenues respectivement lors de la mesure « i » et lors de la calibration,
- H_{32}^i et H_{32}^c sont les fonctions de transfert H_{32} obtenues respectivement lors de la mesure « i » et lors de la calibration.

- $\delta = j \tan(kl_2)$ et $\beta = j \tan(kl_{22})$ sont des fonctions dépendant de la géométrie du capteur d'impédance (voir figure 3),
- S_c est la section du conduit de sortie du capteur d'impédance,
- L_{corr-i} est la correction de longueur liée à la discontinuité entre le conduit de sortie du capteur d'impédance et la section S_i ,
- Z_{ci} est l'impédance caractéristique associée à la section S_i .

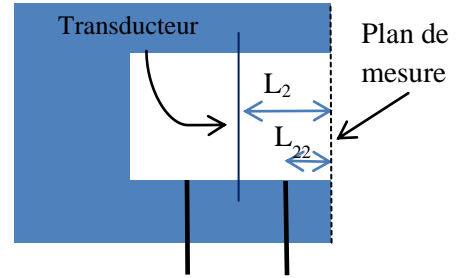


Figure 3: détail du capteur d'impédance

2.3 Obtention de la matrice de diffusion

La matrice de diffusion relie les pressions entrantes aux pressions sortantes (figure 4).

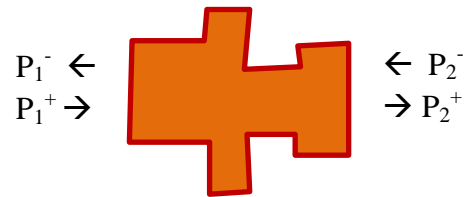


Figure 4: grandeurs acoustiques associées à la matrice de diffusion

Elle est définie par l'expression ci-après :

$$\begin{pmatrix} P_2^+ \\ P_1^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T^+ & R^- \\ R^+ & T^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_1^+ \\ P_2^- \end{pmatrix} \quad (6)$$

dans laquelle

- T^+ et T^- sont les coefficients de transmission dans le sens direct ($1 \rightarrow 2$) et inverse ($2 \rightarrow 1$),
- R^+ et R^- sont, respectivement, les coefficients de réflexion coté 1 et coté 2.

Les coefficients de transmissions sont souvent présentés sous forme de Transmission Loss (TL) :

$$TL^{+,-} = -20 \times \log_{10}(T^{+,-}) \quad (7)$$

Si les sections S_1 et S_2 ne sont pas identiques, l'expression (7) conduit à des valeurs de TL^+ et TL^- différentes. Pour cette raison, nous utilisons dans ce cas un calcul basé sur l'énergie transmise :

$$\begin{aligned}
TL_w^+ &= TL^+ + 10 \times \log_{10}(S_2/S_1) \\
TL_w^- &= TL^- + 10 \times \log_{10}(S_1/S_2)
\end{aligned}
\quad (8)$$

Le lien entre les éléments de la matrice de diffusion et ceux de la matrice impédance est rappelé ci-dessous :

$$\begin{aligned}
T^+ &= 2z_{21}/Den \\
T^- &= 2z_{12}/Den \\
R^+ &= [(z_{11} - 1)(z_{22} + 1) - z_{12}z_{21}]/Den \\
R^- &= [(z_{11} + 1)(z_{22} - 1) - z_{12}z_{21}]/Den
\end{aligned}
\quad (9)$$

avec $Den = (z_{11} + 1)(z_{22} + 1) - z_{12}z_{21}$

3 Analyse qualitative de la méthode

Nous proposons tout d'abord une analyse des performances et des limitations intrinsèques à la méthode exposée. Cette analyse est effectuée via la mesure des caractéristiques d'un tube lisse et rigide de 29mm de diamètre et de 124mm de longueur. Dans tous ce qui suit, les mesures sont effectuées en mode sinus pas à pas.

3.1 Limitations liées au mauvais conditionnement des données

Le tube lisse étant un dispositif symétrique, il n'est pas utile de procéder à une mesure en deux temps avec retournement de l'objet. Le calcul des composants de la matrice de diffusion est effectué avec un seul jeu de fonctions de transfert :

$$H_{12}^1 = H_{12}^2 = H_{12}$$

et

$$H_{32}^1 = H_{32}^2 = H_{32}$$

Ceci permet de quantifier le degré de précision de la méthode de mesure en limitant au maximum les biais expérimentaux.

La figure 5 montre les courbes des modules des impédances.

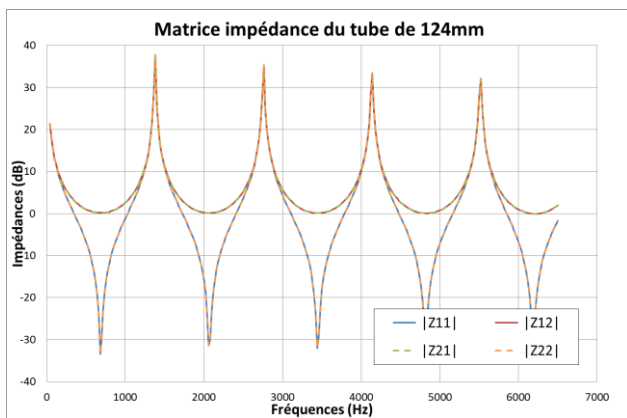


Figure 5: Coefficients de la matrice impédance pour un tube lisse (calcul utilisant la propriété de symétrie de l'objet)

La figure 6 présente les courbes de TL obtenues pour quatre mesures différentes des fonctions de transfert (le tube est repositionné entre chaque mesure). Le TL

théorique du conduit est également indiqué. Il apparaît que la mesure est relativement précise, excepté pour certaines fréquences. Des résultats similaires sont obtenus pour les coefficients de réflexions.

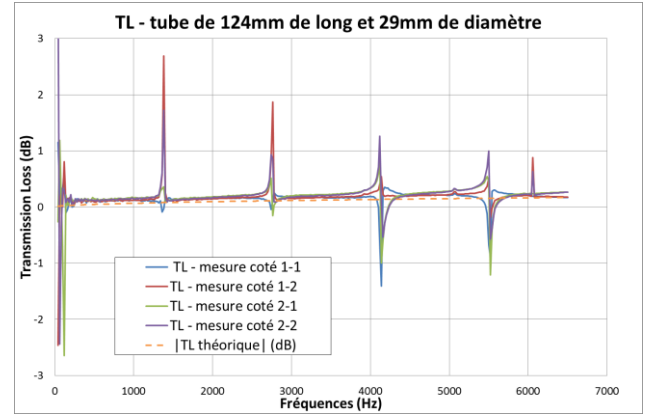


Figure 6: Estimation du TL pour un tube lisse (calcul utilisant la propriété de symétrie de l'objet)

Les erreurs sur les courbes de TL interviennent à des fréquences pour lesquelles les valeurs des impédances sont « infinies » (figure 5), ce qui entraîne une indétermination des coefficients de réflexion et de transmission. Le calcul de la grandeur « Den » (équation 9) peut être utilisé pour identifier les fréquences pour lesquelles le conditionnement des données posera problème.

3.2 Limitations liées au protocole

Les coefficients de la matrice de diffusion du tube sont maintenant calculés à partir de deux mesures différentes avec retournement de l'échantillon (comme si l'échantillon n'était pas symétrique). Cette opération est répétée à deux reprises. Les résultats obtenus pour les Transmission Loss sont présentés en figure 7. Le protocole de mesure en deux étapes n'aggrave pas l'erreur qui reste principalement liée au mauvais conditionnement des données expérimentales.

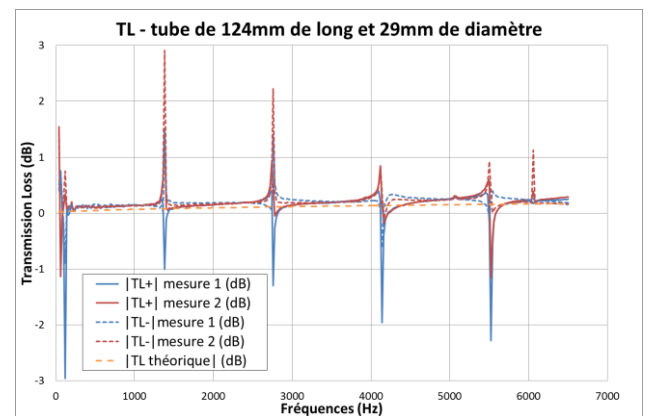


Figure 7: Estimation du TL pour un tube lisse (calcul ne tenant pas compte des propriétés de symétrie)

3.3 Impact de l'objet mesuré

L'analyse a été effectuée jusqu'à présent avec un objet relativement défavorable car peu amorti. Or, en pratique, l'objectif de la méthode est de pouvoir mesurer des composants qui vont apporter une atténuation.

Pour compléter cette étape préliminaire, nous avons mesuré un échantillon de matériau poroélastique. Celui-ci est inséré dans le tube précédemment utilisé et positionné exactement au milieu du conduit de manière à ce que l'ensemble « tube + poroélastique » reste symétrique. Le protocole simplifié utilisé au § 3.1 est employé. La courbe de TL obtenue est présentée en figure 8. Lorsqu'un objet apportant de la dissipation est mesuré, on constate que l'erreur occasionnée par le mauvais conditionnement des données est réduite.

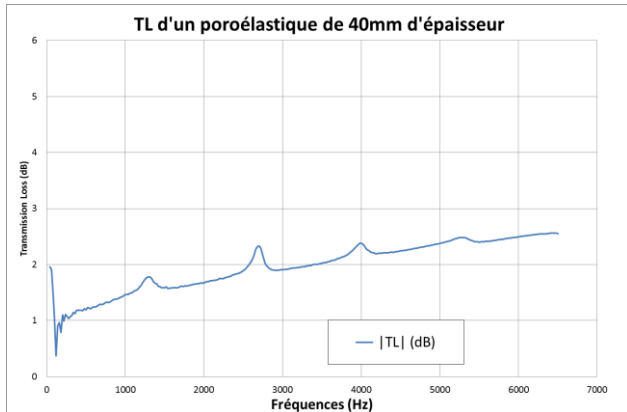


Figure 8: Estimation du TL pour un matériau poroélastique (calcul utilisant la propriété de symétrie de l'objet)

4 Application à la qualification d'un silencieux

La méthode de mesure proposée est appliquée à la caractérisation d'un petit silencieux utilisé pour réduire le bruit de turbo des moteurs de véhicule automobile (figure 9). L'objet testé reste relativement compatible avec les méthodes de mesure en conduit car ses extrémités sont cylindriques, mais ses deux diamètres sont cependant légèrement différents (42mm et 47mm).



Figure 9: Dispositif expérimental appliqué à la qualification d'un silencieux de turbo

4.1 Résultats issus de la nouvelle méthode

Le silencieux n'étant pas symétrique, le protocole expérimental nécessite une mesure en deux étapes. Les courbes des coefficients de la matrice de diffusion sont présentées en figures 10 et 11. La figure 12 contient le résultat du calcul du dénominateur « Den » de l'équation 9. Les données ne sont présentées que sur la bande de fréquence [0-4.5kHz], qui correspond à peu près à la gamme de propagation en mode plan dans le silencieux.

Les Transmission Loss dans le sens direct et dans le sens inverse sont quasiment identiques. Il apparaît cependant des accidents sur l'une ou l'autre des courbes : 1000Hz et 1850Hz sur le TL^+ , 2300Hz sur le TL^- . Ces accidents correspondent aux maxima du dénominateur « Den » (voir figure 12) et sont donc parfaitement identifiables. Les coefficients de réflexion montrent moins d'accidents, excepté à 1000Hz. Aux très basses fréquences, les résultats sont un peu bruités mais l'origine est ici liée au manque de niveau généré par le capteur.

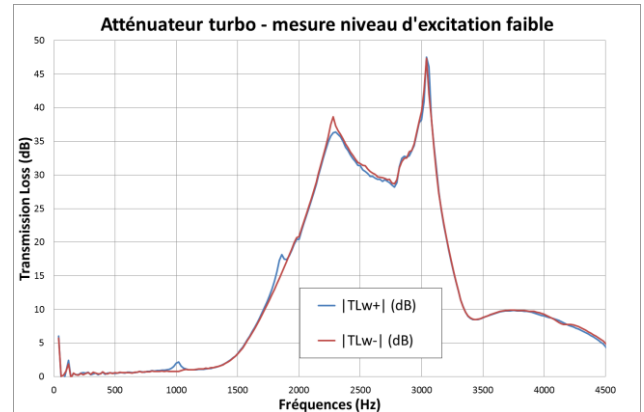


Figure 10: TL de l'atténuateur turbo

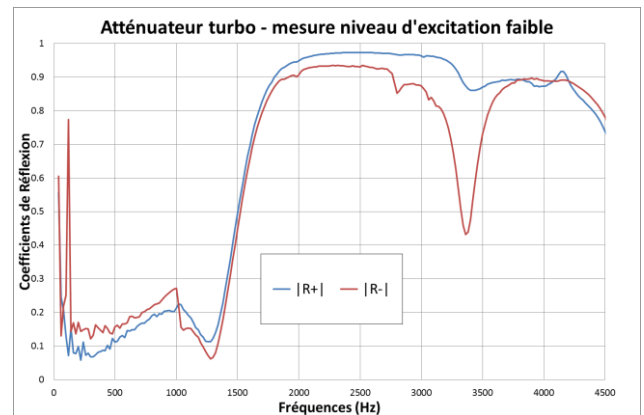


Figure 11: Coefficients de réflexion de l'atténuateur turbo

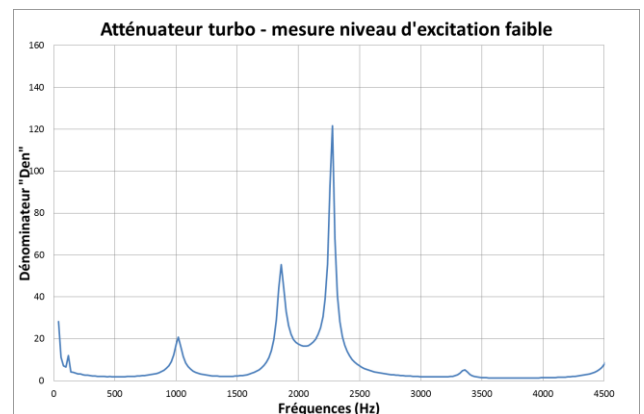


Figure 12: Dénominateur « Den »

4.2 Comparaison avec une méthode de mesure usuelle

Le silencieux est mesuré par l'intermédiaire de méthodes conventionnelles à quatre microphones.

Deux dispositifs sont utilisés :

- conduits de 40mm de diamètre et méthode à deux sources,
- conduits de 30mm de diamètre et méthode à une source + une terminaison anéchoïque (figure 13).

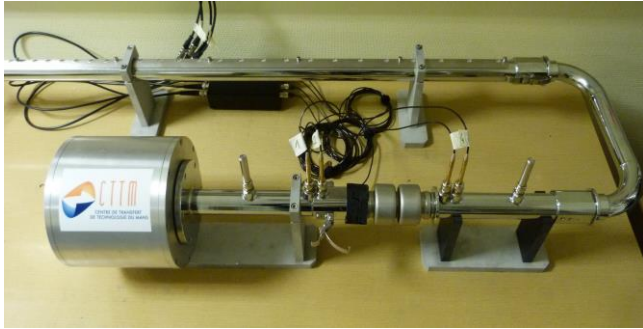


Figure 13: Banc de mesure TL en 30mm (CTTM)

La comparaison des résultats obtenus avec ceux issus des essais sur le conduit de 40mm de diamètre sont présentés en figures 14 et 15. Dans cette configuration, la discontinuité entre le banc d'essais et le silencieux est faible. En revanche, le niveau d'excitation acoustique employé est plus élevé qu'avec le capteur d'impédance.

Concernant le TL, les courbes sont assez proches. Il existe quelques différences au voisinage du maximum d'atténuation, ainsi qu'au-delà de 3.5kHz. Ces écarts peuvent être attribués à la discontinuité ou à la différence de niveau d'excitation. Les coefficients de réflexion sont assez semblables également.

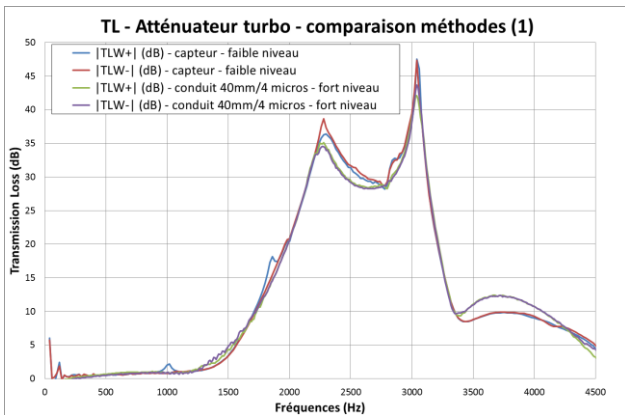


Figure 14: comparaison des TL avec ceux mesurés sur la veine de 40mm de diamètre

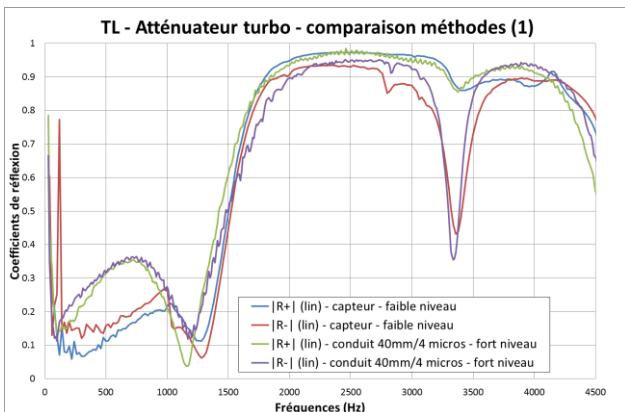


Figure 15: comparaison des coefficients de réflexion avec ceux mesurés sur la veine de 40mm de diamètre

La comparaison des résultats avec ceux issus des essais sur le conduit de 30mm de diamètre sont présentés en figures 16 et 17. Dans cette configuration, la discontinuité entre le banc d'essais et le silencieux est plus importante mais le niveau d'excitation acoustique employé est plus proche de celui généré par le capteur. Par ailleurs, des oscillations sont visibles sur les courbes obtenues : elles sont dues au fait que la terminaison anéchoïque employée ne l'est pas parfaitement.

Concernant le TL, les courbes sont identiques au voisinage du maximum d'atténuation, ce qui confirme l'impact du niveau d'excitation envisagé lors de la comparaison avec les mesures effectuées sur le conduit de 40mm de diamètre. En revanche, des écarts sont constatés aux basses fréquences. Les coefficients de réflexion sont assez semblables également, excepté aux basses fréquences.

Au vu de l'ensemble des résultats, on peut conclure que la discontinuité entre le tube de mesure et l'objet testé, plus importante ici, entraîne une mauvaise estimation des performances du silencieux aux basses fréquences. Sur cette dernière comparaison, la mesure effectuée avec le capteur d'impédance fournit de meilleurs résultats.

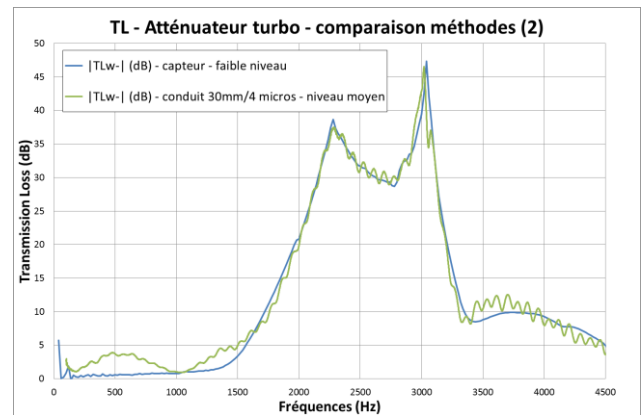


Figure 16: comparaison des TL avec ceux mesurés sur la veine de 30mm de diamètre

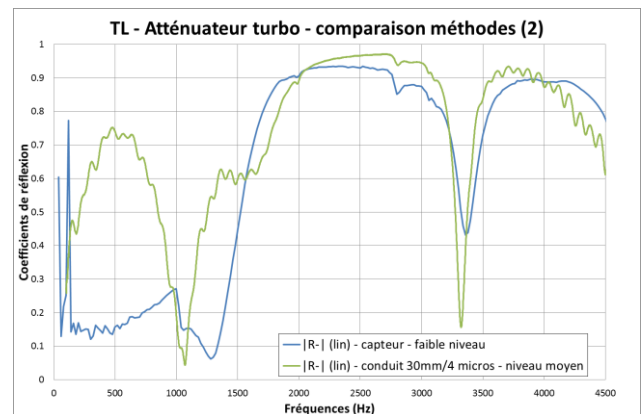


Figure 17: comparaison des coefficients de réflexion avec ceux mesurés sur la veine de 30mm de diamètre

5 Conclusion

Nous avons présenté une nouvelle méthode pour la qualification des guides d'ondes sans écoulement qui utilise le capteur d'impédance développé par le LAUM et le CTTM. Cette méthode fournit des résultats comparables à ceux obtenus par des méthodes usuelles.

Lorsque les données recherchées sont les coefficients de la matrice de diffusion, la nouvelle méthode introduit des

erreurs localisées en fréquence qui sont liées à un mauvais conditionnement des données expérimentales. Il a cependant été montré que les bandes de fréquence incriminées sont identifiables, ce qui permet de s'affranchir partiellement du problème.

En revanche, la méthode proposée a l'avantage de simplifier le raccordement de l'objet à tester, ce qui peut parfois être un atout intéressant. Par ailleurs, la phase de calibration est simplifiée et la compacité réduite par rapport à une méthode conventionnelle à quatre microphones.

En raison des performances intrinsèques du capteur d'impédance, les applications sont pour l'instant limitées aux petits silencieux. La prochaine étape est de concevoir un capteur d'impédance plus puissant de manière à pouvoir appliquer ce principe de mesure à des silencieux de plus grandes dimensions.

Références

- [1] J.-P. Dalmont "Acoustic impedance measurements Part I: a review", *J. Sound Vib.* 243 (3), 427-439 (2001).
- [2] H Boden, M. Aböm, Influence of errors on the two-microphone method for measuring acoustic properties in ducts, *J. Acoust. Soc. Am.* 79(2), 541-549 (1986).
- [3] E. Portier, J-P Léandre, "Experimental determination and prediction of turbocharger transfer matrix", 7th *Symposium – Automotive & Railway Comfort, Le Mans, France (2012)*
- [4] J.C. Le Roux, J.P. Dalmont, A new impedance sensor for industrial applications, *Acoustics 2012, Nantes, France (2012)*.
- [5] F.C. Bannwart; G. Pennelet, P. Lotton, JP Dalmont, Measurements of the impedance matrix of a thermoacoustic core: applications to the design of thermoacoustic engines, *J. Acoust. Soc. Am.* 133(5), 2650-2660 (2013).