

Pour dimensionner les réseaux de ventilation/climatisation des bâtiments collectifs ou industriels, les concepteurs des bureaux d'étude ont besoin de connaître avec une précision suffisante les performances des silencieux absorbants classiquement utilisés pour traiter le bruit généré par les centrales d'air. Les méthodologies expérimentales permettant de déterminer l'atténuation acoustique et le bruit régénéré en écoulement par les silencieux sont décrites par des normes NF EN ISO 7235 en Europe et ASTM E477 aux Etats-Unis. Ces procédures sont notamment basées sur l'utilisation d'une veine d'essai débouchant dans une salle réverbérante où sont réalisées les mesures de puissance acoustique. Des comparaisons inter-laboratoire récentes ont mis en évidence une dispersion très importante des mesures en particulier dans les premières bandes de fréquences (63 et 125 Hz). Les facteurs d'erreurs sont bien identifiés : différence des comportements modaux de la veine d'essais en présence ou non du silencieux, hétérogénéité spatiale du champ acoustique dans la salle réverbérante, perte de puissance acoustique par rayonnement des parois de la veine d'essais.

Le CTTM, qui met en œuvre et fait évoluer un banc dédié à la qualification des silencieux depuis une dizaine d'années, présente dans cet article les résultats d'une étude méthodologique récente qui précise les différents facteurs d'erreurs et leur influence sur la mesure des caractéristiques acoustiques et aéroacoustiques des silencieux absorbants industriels. Cette analyse conduit dans un deuxième temps à proposer des évolutions du banc de mesure permettant de réduire notablement les facteurs d'erreur en utilisant par exemple des terminaisons anéchoïques basses fréquences de conception originale.

1 Introduction

La caractérisation des silencieux pour circuits de ventilation industriels est régit en Europe par la norme NF EN ISO 7235:2009 [1] et aux Etats-Unis par la norme ASTM E477 [2]. Ces normes décrivent une méthode de substitution qui permet de mesurer la perte d'insertion des silencieux par comparaison de deux séries de mesures réalisées avec le silencieux puis avec un conduit lisse de substitution. La méthode préconisée pour évaluer la puissance acoustique à la sortie de la veine d'essais consiste à utiliser une salle réverbérante dans laquelle sera mesurée une moyenne spatiale et temporelle de la pression acoustique émise à la sortie de la veine d'essais.

Compte tenu des dimensions parfois imposantes des silencieux testés (sections de l'ordre du m²), la propagation acoustique est multimodale dès les basses fréquences et les méthodes de mesure en conduit (doublets microphoniques en parois) ne peuvent pas être mises en œuvre sur la quasi intégralité de la gamme de fréquence à explorer. La méthode préconisée par la norme reste donc la seule méthode applicable pour caractériser les propriétés d'atténuation des silencieux sur une large gamme de fréquences.

Des comparaisons inter-laboratoires réalisées en Amérique du nord [3] ont mis en évidence des dispersions très importantes des résultats de mesures dans le domaine des basses fréquences (écart-types de reproductibilité supérieurs à 10 dB dans les premières bandes d'octave 63 et 125 Hz). Or, la qualification des performances des silencieux dans les basses fréquences représente un enjeu important car c'est notamment dans ce domaine que se différencient les performances des différents modèles, l'atténuation des moyennes et hautes fréquences étant généralement facile à réaliser avec des silencieux à baffles classiques.

Les facteurs d'erreurs de la mesure dans les basses fréquences sont bien identifiés. Il s'agit principalement de :

- La différence des comportements modaux de la veine d'essais en présence ou non du silencieux,
- De la modification du comportement de la source acoustique en présence ou non du silencieux en essais,
- De la qualité du champ diffus de la salle réverbérante dans les premières bandes de fréquences,

- De l'émissivité des différents éléments de la veine d'essais et notamment du conduit de substitution.

Lors d'une précédente étude [4], nous avons mis en évidence l'influence de ces différents facteurs d'erreur sur une veine d'essais de section 0,3 x 0,5 m². Il en était ressorti un ensemble de préconisations visant à améliorer la qualité des mesures dont notamment une procédure spécifique dédiée aux basses fréquences qui consistait à réaliser des mesures en conduit dans le domaine de propagation des ondes planes en plaçant une terminaison anéchoïque en sortie de veine d'essais.

Cette proposition, si elle s'est avérée tout à fait pertinente, complique notablement la procédure d'essais en nécessitant le montage de deux configurations d'essais distinctes et l'utilisation de 4 microphones supplémentaires.

La proposition qui est faite dans cet article représente une mise en œuvre moins complexe avec des adaptations relativement simples du banc de mesure normalisé et une procédure identique ; Il s'agit simplement de placer entre l'extrémité de la veine d'essais et la salle réverbérante, de manière permanente, une terminaison anéchoïque basses fréquences de très faible encombrement qui permettra d'améliorer très sensiblement les conditions de mesures.

La terminaison anéchoïque proposée pour cette application est issue d'un principe original proposé en 1989 par des chercheurs du LAUM [5] et dont le développement récent a été réalisé au CTTM en partenariat avec le LAUM [6]. Cette terminaison anéchoïque présente la particularité d'être adaptée aux très basses fréquences pour un encombrement particulièrement réduit.

L'étude présentée dans cet article a pour principal objectif de valider l'application de la procédure normalisée en présence de cette terminaison anéchoïque pour toute la gamme de fréquences concernée par la mesure.

Cette configuration expérimentale n'est pas adaptée aux mesures en conditions d'écoulement. Cependant, pour la majorité des applications, l'atténuation des silencieux n'est pas influencée par l'écoulement dont la vitesse excède rarement 20 m/s.

2 La terminaison anéchoïque résistive

Les principes de conception de la terminaison anéchoïque ont été décrits dans des publications précédentes [5,6].

Cette terminaison anéchoïque a fait l'objet depuis quelques années d'un développement qui a permis de mettre au point dans un premier temps des modèles de petites dimensions adaptés à des conduits de diamètres de l'ordre de 30 à 50 mm. Dans ces dimensions, les études expérimentales ont conduit à caractériser les performances de cette terminaison anéchoïque dans une large gamme de fréquences limitée seulement par l'apparition des modes transverses. Il est ainsi apparu que pour un coefficient de réflexion minimum (proche de zéro) dans les premières bandes de fréquences, il apparaît une fréquence de « coupure » à partir de laquelle le coefficient de réflexion remonte de manière importante.

C'est le cas par exemple de la terminaison réalisée pour des conduits de diamètre 35 mm dont le coefficient de réflexion mesuré est représenté sur la figure 1.

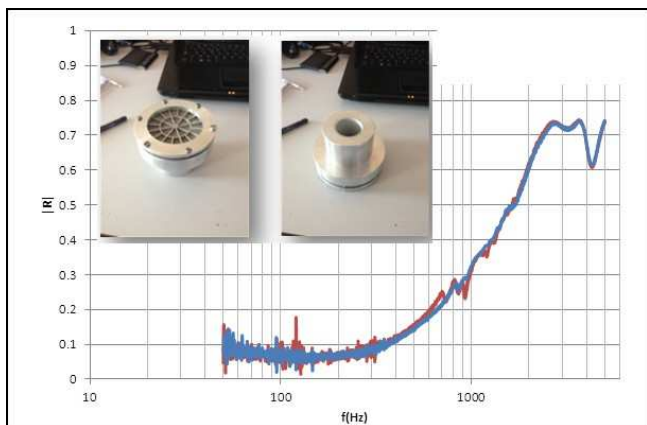


Figure 1 : Coefficient de réflexion d'une terminaison anéchoïque adaptée à un diamètre de conduit de 35 mm

La déclinaison de ce principe de terminaison anéchoïque dans des dimensions plus importantes s'est avérée réalisable et a été validée à ce jour jusqu'à une section de 0,5 x 0,3 m² (figure 2).

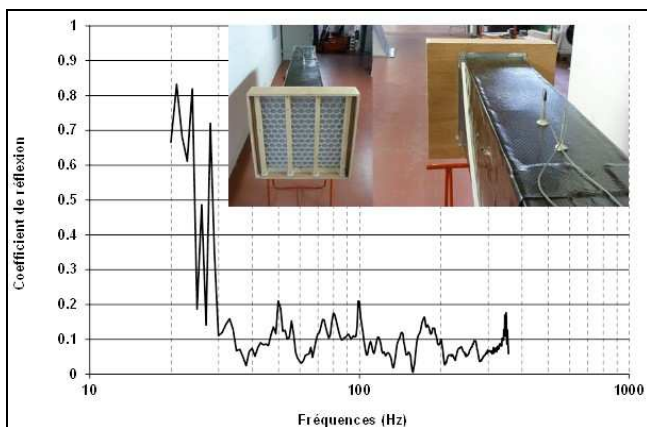


Figure 2 : Coefficient de réflexion d'une terminaison anéchoïque adaptée à une section de 0,5 x 0,3 m²

Les dernières réalisations de terminaisons anéchoïques ont bénéficiées d'améliorations du concept dont, en particulier, un traitement acoustique des moyennes et hautes fréquences sur une faible longueur immédiatement en amont de la terminaison. Ces améliorations ont permis d'étendre leurs performances vers le haut du spectre en fréquence. Le modèle réalisé pour la présente étude (figure 3), adaptée à un diamètre de conduit de 160 mm, en est une

illustration avec un coefficient de réflexion inférieur à 0,2 entre 40 Hz et 1 kHz.

Ces différentes réalisations montrent qu'il est probablement possible d'étendre les performances de ce type de terminaison anéchoïque à toute la gamme de fréquences.

De même, on peut probablement envisager la réalisation de terminaisons anéchoïques adaptées à des grandes sections de veine (de l'ordre du m²). Pour ces modèles de grandes dimensions, la difficulté sera alors de déterminer une méthodologie permettant de les qualifier sur une large gamme de fréquences, en propagation multimodale.

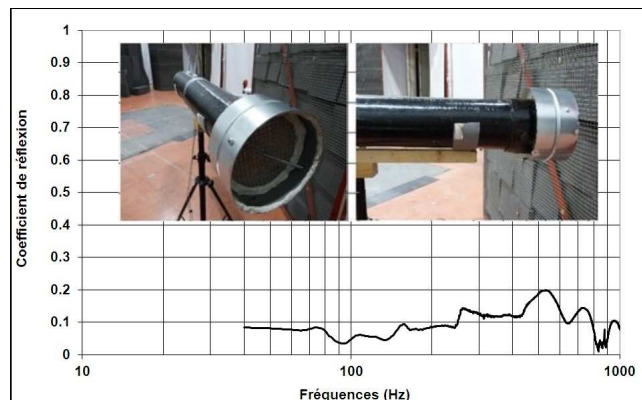


Figure 3 : Coefficient de réflexion d'une terminaison anéchoïque adaptée à un diamètre de conduit de 160 mm

3 La veine d'essais avec terminaison anéchoïque

Le banc de mesures défini pour réaliser cette campagne d'essais est constitué (figure 4) d'une veine d'essais principale de diamètre 160 mm connectée en amont à une source acoustique large bande et à son extrémité aval à une terminaison anéchoïque.

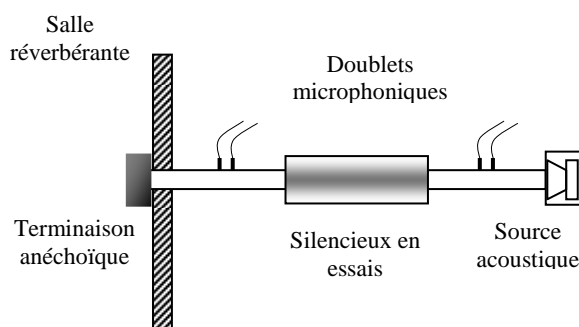


Figure 4 : Schéma de principe de l'installation d'essais

Le choix de cette dimension de conduit permet de pouvoir réaliser des mesures en conduit en conditions d'ondes planes sur une plage de fréquences suffisamment large jusqu'à environ 1 kHz. En effet, dans la réalité des mesures industrielles les plus courantes, les dimensions des silencieux et donc des veines d'essais associées limitent la plage de fréquences de la propagation en ondes planes à 200 ou 300 Hz et il est difficile dans cette configuration d'étudier les phénomènes de propagation acoustique basses fréquences.

Pour réaliser les mesures basses fréquences, deux doublets microphoniques à membranes affleurant aux parois internes des conduits sont positionnés de part et d'autre du silencieux en essais.

Les mesures de la puissance acoustique transmise à l'extrémité de la veine d'essais sont effectuées dans la salle réverbérante du CTTM. Avec 350 m³ de volume intérieur, aucun mur parallèle et un ensemble de diffuseurs, cette salle est qualifiée pour pouvoir réaliser des mesures en conditions de champ diffus à partir de 100 Hz. Un ensemble de 4 microphones est réparti dans la salle pour pouvoir mesurer la pression acoustique moyenne.

4 Etude d'un cas de silencieux absorbant

4.1 Méthodologie expérimentale

Le silencieux choisi comme cas d'étude est de conception très classique. Il s'agit d'un silencieux à passage intégral de 1 m de long utilisant 10 cm de laine de roche en périphérie contenue par une grille perforée à environ 50 %.

L'objectif de ces essais étant de mettre en évidence l'influence du taux d'ondes stationnaires dans la conduite, un soin particulier a été apporté au montage et aux conditions de mesure pour minimiser au mieux l'influence des autres facteurs d'erreur. Ainsi, l'émissivité des conduits est limitée par l'emploi de conduits cylindriques rigides de faibles diamètres, la mesure de la pression acoustique en salle réverbérante est obtenue à partir d'un grand nombre de moyennes pour en minimiser la dispersion et par conception, la source acoustique utilisée est une source à débit acoustique constant, peu sensible aux variations d'impédance de la veine sur laquelle elle est connectée.

Les mesures sont réalisées dans la gamme de fréquences 40 Hz-10 kHz en utilisant un signal source de type bruit rose.

Trois séries d'essais sont réalisées :

- avec le silencieux
- avec un conduit de substitution,
- sans conduit de substitution (ligne raccourcie).

Les essais ainsi réalisés sont répétés après avoir remplacé la terminaison anéchoïque par un simple cône d'adaptation qui permet d'augmenter la section de sortie d'un rapport 2,5 sur une longueur de 30 cm. De même que nous avons choisi de réaliser des essais dans une veine de section réduite pour élargir la bande de fréquence d'observation des phénomènes basses fréquences, ce cône d'adaptation est une mise à l'échelle des pièces d'adaptations utilisées dans la réalité des mesures de silencieux industriels.

La figure 5 compare les coefficients de réflexion mesurés avec et sans terminaison anéchoïque lorsque la veine d'essais est connectée à la salle réverbérante.

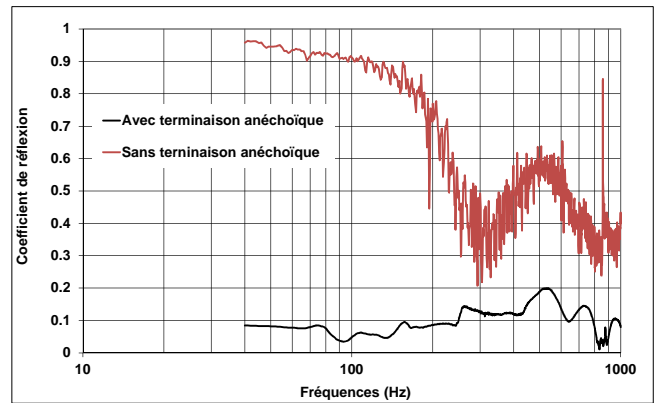


Figure 5 : Perte par transmission du silencieux en essais

4.2 Mesure de la perte par transmission

La mesure de la perte par transmission réalisée avec la terminaison anéchoïque constitue une référence pour déterminer les propriétés d'atténuation du silencieux dans le domaine de fréquence de la propagation en ondes planes (40 Hz – 1 kHz). Elle est réalisée en appliquant la méthode classique de détermination de la matrice de diffusion du silencieux en essais à partir des mesures de fonctions de transfert fournies par les deux doublets microphoniques positionnés en amont et en aval.

C'est cette mesure qui nous servira dans la suite à évaluer les différentes configurations d'essais.

La figure 6 représente le résultat de cette mesure pour les bandes de tiers d'octave comprises entre 50 Hz et 800 Hz.

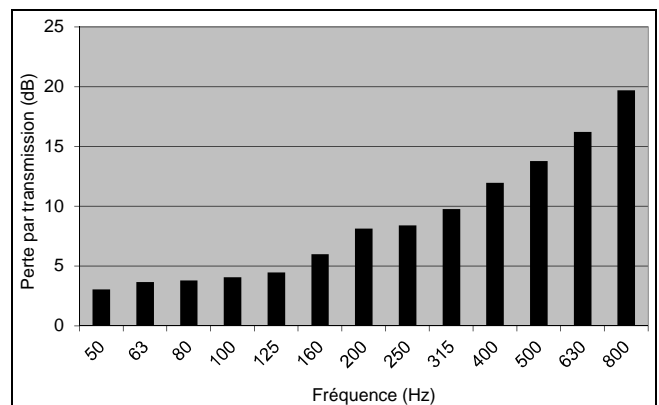


Figure 6 : Perte par transmission du silencieux en essais

4.3 Mesure de la perte d'insertion avec et sans terminaison

Dans un premier temps, la perte d'insertion est mesurée avec la terminaison anéchoïque et lorsque cette dernière est remplacée par un cône d'adaptation. La figure 7 représente les résultats obtenus par bandes de tiers d'octave dans la gamme de fréquence des ondes planes. L'analyse de ces mesures montre que l'emploi de la terminaison anéchoïque permet de rapprocher les valeurs de perte par insertion et de perte par transmission avec des écarts qui restent cependant non négligeables.

Ce résultat n'est pas surprenant car dans la méthodologie expérimentale qui permet de déterminer la perte d'insertion, le fait de remplacer le silencieux en essais par un conduit de

substitution entraîne inévitablement une modification de l'impédance acoustique vue par la source et modifie la puissance acoustique injectée dans la veine d'essais, même si la source est invariante. Cette variation de la puissance injectée est directement liée à la rupture d'impédance à l'entrée du silencieux mais également à l'impédance terminale de la veine d'essais.

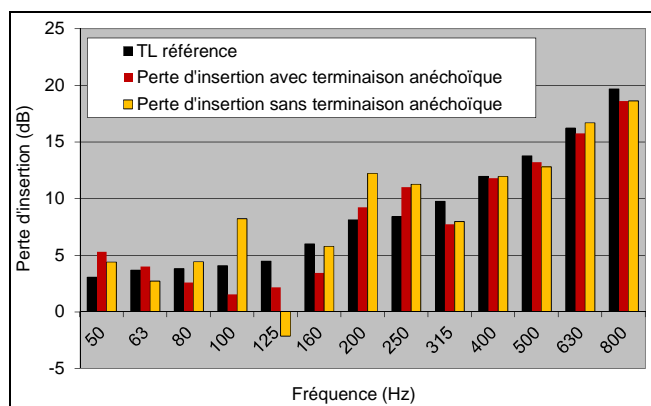


Figure 7 : Perte d'insertion du silencieux en essais

Pour mettre en évidence ces phénomènes nous avons mesuré la puissance injectée par la source dans différentes configurations.

4.4 Prise en compte de la puissance injectée

La puissance injectée par la source dans la veine d'essais est mesurée à l'aide du doublet microphonique placé en amont du silencieux.

Les figures 8 et 9 comparent les puissances acoustiques injectées en présence ou non du silencieux respectivement sans et avec une terminaison anéchoïque.

Les écarts avec et sans silencieux sont logiquement beaucoup plus importants lorsque l'on n'utilise pas de terminaison anéchoïque. En effet, dans ce dernier cas, le coefficient de réflexion en sortie de veine est proche de 1, le taux d'ondes stationnaires très important sans silencieux est fortement réduit en amont lorsque ce dernier est en place. La puissance acoustique en est alors fortement impactée.

Cependant, avec la terminaison anéchoïque, les écarts restent notables et peuvent expliquer les différences qui subsistent entre pertes par transmission et pertes par insertion. Pour vérifier cela, nous avons corrigé le calcul de la perte d'insertion par la différence des puissances injectées avec et sans silencieux. Le résultat de cette correction est comparé à la mesure d'origine sur la figure 10. Il ressort clairement que la prise en compte de la différence des puissances injectées avec et sans silencieux permet de corriger efficacement la perte d'insertion qui se rapproche sensiblement de la perte par transmission.

Les derniers écarts qui subsistent encore entre les deux déterminations sont probablement attribuables à la moindre qualité du champ diffus en dessous de 100 Hz dans la salle réverbérante.

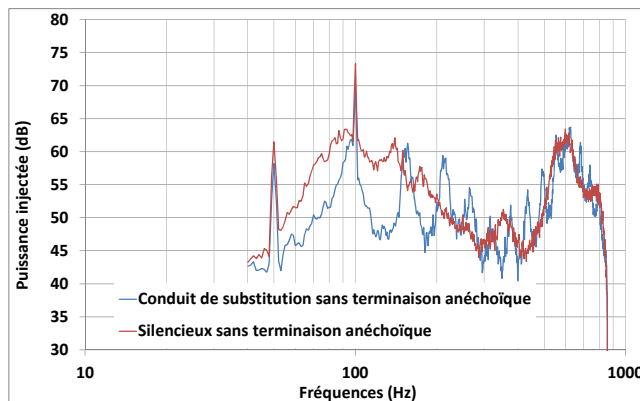


Figure 8 : Mesure des puissances injectées sans terminaison anéchoïque

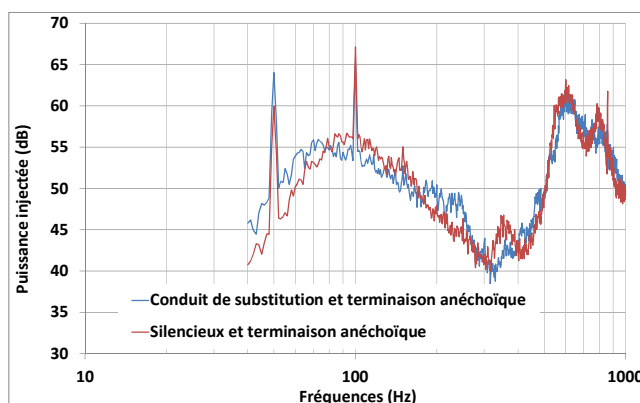


Figure 9 : Mesure des puissances injectées avec terminaison anéchoïque

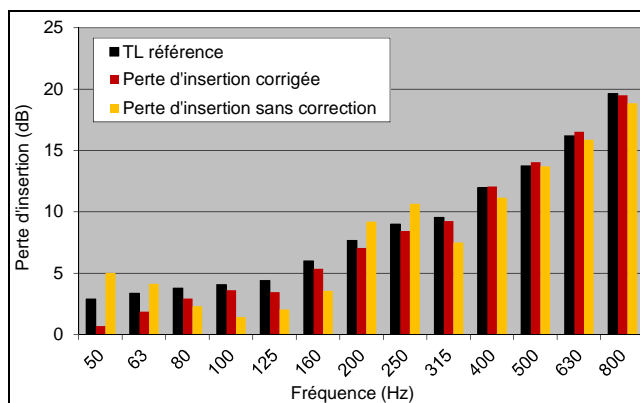


Figure 10 : Perte d'insertion avec et sans correction par la différence de puissances injectées

4.5 Mesures sans conduit de substitution

Dans le contexte de mesures réalisées avec une terminaison anéchoïque, il est légitime de se poser la question de l'utilité du conduit de substitution dans la procédure d'essais. En effet, ce conduit de substitution a pour effet de maintenir la longueur de la veine d'essais identique pour les deux mesures avec et sans silencieux. En présence d'un très faible taux d'ondes stationnaires, la longueur de la veine d'essais n'influence plus la propagation acoustique. Le fait de simplement connecter les parties amont et aval de la veine d'essais pour la mesure de référence sans silencieux permettra en outre de supprimer

un facteur d'erreurs important dans certain cas : l'émissivité acoustique du conduit de substitution.

Les résultats présentés sur la figure 11 permettent de valider cette possibilité.

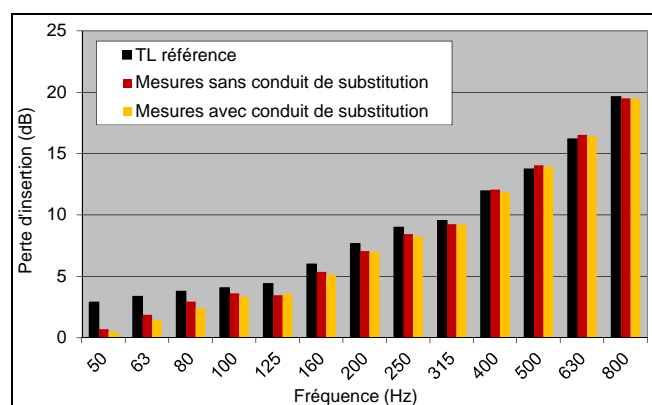


Figure 11 : Pertes d'insertions mesurées avec et sans conduit de substitution

4.6 Mesures sur toute la gamme de fréquences

La terminaison anéchoïque et son influence sur la procédure d'essais décrite par la norme ISO 7235 n'ont pu être caractérisées de manière approfondie que dans le domaine des ondes planes avec la méthode des doublets microphoniques à travers la détermination de la matrice de diffusion et des puissances acoustiques en conduit.

Pour estimer l'impact de la présence de la terminaison anéchoïque pour l'ensemble de la gamme de fréquence définie par la norme nous comparons sur le graphe de la figure 12 les mesures avec et sans terminaison anéchoïque entre 50 Hz à 10 kHz.

Il ressort que les deux déterminations sont bien en accord jusqu'à 4 kHz. En revanche, pour les dernières bandes de fréquence, il apparaît un écart important qui atteint 8 à 9 dB à 10 kHz. A ce jour, nous n'avons pas identifié la cause de ces écarts. Il pourrait s'agir d'un coefficient de réflexion important de la terminaison anéchoïque dans les hautes fréquences. Malheureusement, la qualification de ce paramètre dans le contexte d'une propagation acoustique multimodale n'est pas réalisable avec les méthodes classiques.

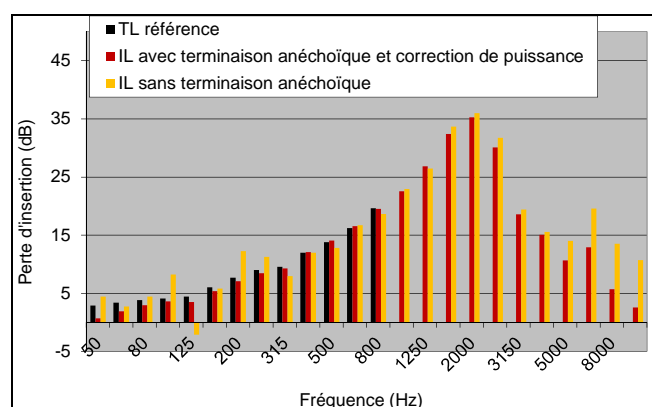


Figure 12 : Pertes d'insertions mesurées sur toute la gamme de fréquences

5 Conclusion

L'étude méthodologique présentée dans ce papier vise à mettre en évidence le principal écueil de la norme ISO 7235 qui définit les procédures de mesure de la perte d'insertion des silencieux absorbants : la variation du taux d'ondes stationnaires en basses fréquences dans les différentes parties de la veine d'essais avec et sans silencieux.

Pour fiabiliser et limiter ce facteur d'erreurs important, une première proposition consiste à utiliser une terminaison anéchoïque efficace dans les très basses fréquences. Cette terminaison, développée au CTTM depuis quelques années en partenariat avec le LAUM, s'est révélée performante dans une large bande de fréquence et déclinable dans des grandes dimensions.

Dans le contexte de la mesure normalisée des silencieux par absorption, l'usage de cette terminaison anéchoïque (peu encombrante) permet clairement d'améliorer les conditions de mesures. Son usage est validé pour une large gamme de fréquence et apporte une amélioration notable de la précision des mesures dans les basses fréquences.

Malgré cela, le principe de mesure par substitution entraîne intrinsèquement un facteur d'erreur lié à la rupture d'impédance acoustique à l'entrée du silencieux en essais. Cette rupture d'impédance est à l'origine d'une inévitable variation de la puissance acoustique injectée dans la veine d'essais. Nous avons pu vérifier que la prise en compte de cette puissance injectée permet d'améliorer encore la précision des mesures. Cette correction, pour être mise en œuvre implique l'installation d'un doublet microphonique entre la source acoustique et le silencieux en essais.

Enfin, dans les conditions de mesures permises par la terminaison anéchoïque, il devient superflu de faire les mesures de référence avec un conduit de substitution. Une simple connexion des parties amont et aval de la veine d'essais est suffisante et permet dans certains cas d'éviter les erreurs de mesures dues à l'émissivité du conduit de substitution.

Références

- [1] Norme NF EN ISO 7235 : 2009 : "Acoustique – Modes opératoires de mesures en laboratoire pour silencieux en conduit et unités terminales - Perte d'insertion, bruit d'écoulement et perte de pression totale."
- [2] ASTM E 477-06a, *Standard Test Method for Measuring Acoustical and Airflow Performance of Duct Liner and Prefabricated Silencers*, ASTM International, 2006
- [3] Jerry G. Lilly, "Suggested Modifications to ASTM Test Method E 477", *Sound & Vibration*, juin 2011
- [4] F.Fohr & al, "Les problèmes posés par l'application de la norme ISO 7235 pour la mesure des silencieux dans les basses fréquences", *Acoustique & Techniques* n°79-80, pp 53-57, 2015
- [5] JP. Dalmont, J. Kergomard, X. Meynial, "Réalisation d'une terminaison anéchoïque pour un tuyau sonore aux basses fréquences", *Compte rendu de l'académie des sciences de Paris*, t. 309, série II, p. 453-458 (1989)
- [6] JP. Dalmont, E. Portier, "Une terminaison anéchoïque toutes fréquences ?", *Congrès Français d'Acoustique*, Poitiers, 22-25 avril 2014