

Les problèmes posés par l'application de la norme ISO 7235 pour la mesure des silencieux dans les basses fréquences

François Fohr,
Damien Parmentier
Centre Transfert de Technologie du Mans
20, rue Thales de Milet
72000 Le Mans
E-mail : ffohr@cttm-lemans.com

Jérémy Chancel
F2A
Parc d'activité des 2 B
70, impasse des Barmettes
01360 Béligneux
E-mail : jchancel@f2a.fr

Résumé

Les silencieux à baffles absorbants pour circuits de ventilation industriels doivent être qualifiés en Europe suivant la norme NF EN ISO 7235:2009. Celle-ci décrit les modes opératoires tant pour déterminer les performances acoustiques (pertes d'insertion) à l'aide d'une méthode par substitution que le bruit régénéré et les pertes de charges en conditions d'écoulement. Dans le domaine des basses fréquences, comprenant notamment les deux premières bandes d'octave centrées sur 63 et 125 Hz, la mise en œuvre de la norme donne des résultats très imprécis. Cela s'explique par la différence des comportements modaux de la veine d'essais en présence ou non du silencieux et de l'hétérogénéité spatiale du champ acoustique dans la salle réverbérante où débouche la veine d'essais. Le travail présenté dans cet article a consisté à préciser expérimentalement l'impact de ces différents facteurs d'erreurs pour finalement proposer une méthodologie adaptée à la caractérisation dans les basses fréquences des silencieux. Cette méthode est basée sur une modification relativement simple du banc de mesure normalisé.

Contexte

Dans le domaine du bâtiment, les silencieux utilisés dans les gaines de ventilation pour réduire les propagations acoustiques en conduit sont le plus souvent constitués de baffles absorbants parallèles utilisant principalement de la laine minérale pour absorber l'énergie acoustique. Dans la détermination des niveaux sonores engendrés par les réseaux aérauliques, le dimensionnement des silencieux consiste essentiellement à réaliser le bon compromis entre l'encombrement de l'installation, les pertes de charge et le bruit régénéré par les baffles insérés dans la conduite et l'atténuation acoustique recherchée.

La courbe d'atténuation des silencieux à baffles de conception classique a toujours la même allure en cloche avec un maximum de performances dans les moyennes fréquences et une faible atténuation dans les premières bandes d'octave (figure 1). Les caractéristiques de bruit des systèmes de génération d'air (CVC) et les réglementations dans le bâtiment de plus en plus exigeantes (HQE, RT 2012, etc..) rendent souvent nécessaire le traitement des composantes basses fréquences et, dans ce cas, la seule solution pour le concepteur consiste à rallonger le silencieux et/ou à diminuer les voies d'air au détriment de la perte de charge (augmentation de la consommation d'énergie) et du bruit régénéré en sortie.

La détermination des performances des silencieux dans les basses fréquences et en particulier dans les deux premières bandes d'octave, 63 et 125 Hz, est donc particulièrement critique pour la conception d'un réseau aéraulique et un enjeu majeur pour l'avenir. La concurrence dans ce domaine est importante et les valeurs communiquées sont rarement issues d'essais normalisés réalisés dans des laboratoires indépendants.

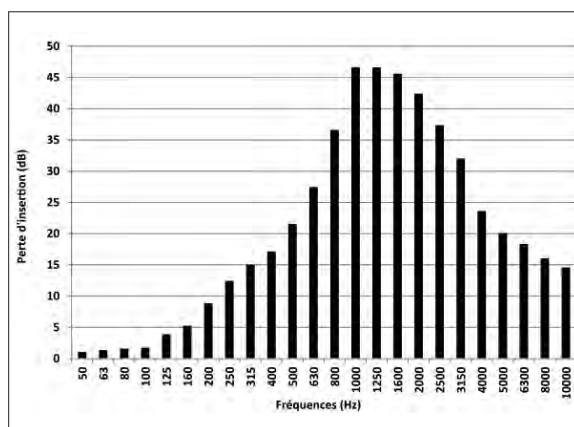


Fig. 1 : Exemple de courbe d'atténuation d'un silencieux à baffles absorbants

En Europe, la qualification des performances des silencieux passifs est décrite par la norme NF EN ISO 7235:2009 qui permet de déterminer la perte par insertion des silencieux par comparaison des puissances acoustiques transmises à l'extrémité d'une veine d'essais avec et sans silencieux. La mesure de puissance est réalisée de préférence dans une chambre réverbérante à laquelle est connectée la veine d'essais. Le domaine de fréquences représentatif défini par la norme est compris entre 50 Hz et 10 kHz. Or, les mesures réalisées notamment dans les deux premières bandes d'octave (63 et 125 Hz) font ressortir des fortes dispersions avec parfois des valeurs négatives de la perte par insertion. Ces dispersions relevées au sein d'un même laboratoire (écarts de répétabilité) se révèlent en pratique plus élevées que les estimations d'écart de reproductibilité indiquées par la norme.

Il semble qu'il y ait peu de publications récentes sur ce sujet, la raison principale étant probablement le peu de laboratoires qui mettent en œuvre et respectent l'intégralité des exigences de la norme ISO 7235.

Cependant, au moment de la création de cette norme, une estimation théorique des erreurs dues aux réflexions aux deux extrémités de la veine d'essais avait été présentée par le CSTB [1]. Cette étude met en évidence une dispersion importante dans la détermination de la perte par insertion et de la puissance de bruit régénéré par le silencieux en essais même pour des coefficients de réflexion relativement faibles.

Aux Etats-Unis, on trouve une publication plus récente [2] qui concerne les problèmes posés par l'application pour les basses fréquences de la norme américaine équivalente ASTM E477. Cette étude, basée sur l'analyse de plusieurs *Round-Robin Test*, met notamment en évidence des écarts-types de reproductibilité de l'ordre de 15 dB dans la bande de tiers d'octave centrée sur 50 Hz. Il est intéressant de noter que dans cette bande de fréquences, les atténuations des silencieux classiques sont généralement de l'ordre du décibel. Le comité de normalisation américain ASTM procède actuellement à une nouvelle révision de la norme [3] avec une extension à la bande 63 Hz qui en est exclue actuellement.

La complexité de mise en œuvre de la norme ISO 7235 et les incertitudes de mesures dans les basses fréquences rendent difficile la qualification des silencieux par les fabricants de leur catalogue de silencieux et il semblerait que pour certains d'entre eux les valeurs (parfois irréalistes) indiquées dans les fiches techniques ne soient pas issues de mesures normatives [4].

Au Centre de Transfert de Technologies du Mans, nous mettons en œuvre depuis une dizaine d'années un banc de mesure dédié à la qualification des silencieux à baffles suivant la norme ISO 7235. En partenariat avec F2A, équipementier spécialisé dans la conception et la fabrication de composants aérauliques et acoustiques, nous avons réalisé récemment un ensemble d'expérimentations visant à qualifier les phénomènes physiques en jeu dans le domaine des basses fréquences et à proposer une méthodologie plus adaptée.

Nous nous sommes intéressés uniquement aux mesures sans écoulement d'air mais il est clair que la mesure du bruit régénéré est également influencée dans les basses fréquences par les mêmes problèmes de dispersion. Globalement, on peut répertorier quatre phénomènes distincts susceptibles de fausser les mesures dans les premières bandes d'octave :

- La différence des comportements modaux de la veine d'essais en présence ou non du silencieux en essai,
- La modification du comportement de la source en présence ou non du silencieux en essai,
- Le comportement modal de la salle réverbérante,
- Le rayonnement par couplage vibro-acoustique de la veine d'essai.

Nos expérimentations ont porté sur les trois derniers points, le premier ayant été bien mis en évidence par la théorie [1].

Les exigences de la norme et les basses fréquences

La norme ISO 7235 privilégie l'utilisation d'une salle réverbérante pour réaliser les mesures acoustiques en aval de la veine d'essais. Cette salle doit être conforme aux exigences de la norme ISO 3741 à partir de la bande d'octave 125 Hz. Cependant, la norme ISO 7235 autorise les mesures à partir de la bande de tiers d'octave centrée sur 50 Hz. Dans les premières bandes d'octave, les mesures ne sont donc plus réalisées en conditions de champs diffus avec notamment la présence de résonances acoustiques marquées et un champ acoustique très hétérogène.

On peut noter par ailleurs que l'estimation des écarts-types de reproductibilité indiqués par la norme ISO 7235 entre 50 Hz et 500 Hz est singulièrement irréaliste si on les compare simplement à ceux de la norme ISO 3741. En effet, la procédure de mesure décrite par la norme ISO 3741, qui est mise en œuvre à deux reprises pour déterminer la perte d'insertion d'un silencieux, est susceptible de générer un écart-type de reproductibilité de l'ordre de 4 dB à 50 Hz alors que la norme ISO 7235 l'estime à 1,5 dB.

L'installation d'essais du CTTM

L'installation d'essais, conforme aux exigences de la norme ISO 7235, a été adaptée pour pouvoir réaliser des mesures spécifiques dans les basses fréquences. Entre 50 Hz et 220 Hz, compte tenu des dimensions de la veine d'essai ($0,5 \times 0,75 \text{ m}^2$), seul le mode plan se propage, ce qui autorise les mesures de pression acoustique en paroi avec la technique éprouvée du doublet microphonique. En positionnant un doublet microphonique en amont du silencieux en essais et un autre en aval, il est alors relativement simple de déterminer les puissances acoustiques amont et aval et d'en déduire la perte par transmission (mesure directe) ou la perte par insertion (mesure comparative avec et sans silencieux). Pour optimiser la précision des mesures la veine d'essais doit être déconnectée de la salle réverbérante et son extrémité équipée d'une terminaison anéchoïque.

Le banc conforme à la norme ISO 7235

Pour réaliser les mesures de la perte par insertion sans écoulement d'air la norme ISO 7235 définit un ensemble d'exigences à respecter qui dimensionne de fait les différents éléments du banc de mesure. La figure 2 représente de manière simplifiée les principaux éléments du banc utilisé au CTTM :

- Une terminaison anéchoïque placée en amont de la source permet de limiter son coefficient de réflexion «vu» par le silencieux en essais,
- La source est constituée de quatre haut-parleurs et d'une enceinte close, dimensionnés pour atteindre des niveaux élevés dans toutes les bandes de fréquences,
- Le silencieux en essais est remplacé par un conduit droit de même longueur et de même section pour la mesure à vide (détermination de la perte d'insertion),
- La veine d'essais débouche dans une salle réverbérante de 350 m^3 conforme aux exigences de la norme ISO 3741 à partir de la bande d'octave 125 Hz. Un élément de transmission raccorde la veine d'essai à la salle réverbérante de manière à réduire les réflexions terminales.

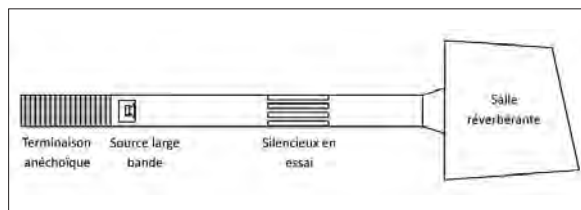


Fig. 2 : Représentation du banc d'essais conforme aux exigences de la norme ISO 7235

Le banc adapté aux mesures basses fréquences

Pour réaliser les mesures spécifiques aux basses fréquences, une adaptation du banc a consisté à déconnecter la veine d'essais de la salle réverbérante et à placer une terminaison anéchoïque à son extrémité (figure 3). Les mesures sont réalisées par deux doublets microphoniques disposés en paroi, en amont et en aval du silencieux à caractériser dans une gamme de fréquences limitée à la seule propagation du mode plan. La limite en fréquence est alors fixée par la plus grande dimension transversale des conduits rectangulaires utilisés (0,75 m), soit 220 Hz environ. Dans cette configuration peuvent être estimées aussi bien la perte par transmission que la perte par insertion avec l'utilisation d'un conduit de substitution.

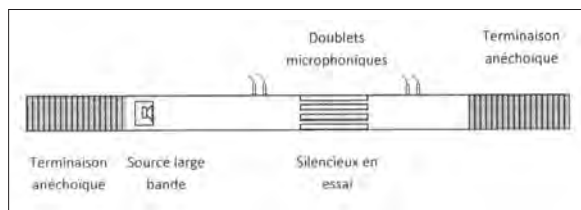


Fig. 3 : Adaptation du banc d'essais aux mesures basses fréquences

La terminaison anéchoïque

La terminaison anéchoïque installée sur le banc de mesure dédié aux basses fréquences a été dimensionnée spécifiquement pour cette application (figure 4). La technologie utilisée est directement adaptée de développements récents réalisés au CTTM en partenariat avec le Laboratoire de l'Université du Maine [5,6]. Le principe général de cette terminaison anéchoïque consiste à réaliser une adaptation d'impédance en extrémité de conduit en dimensionnant précisément un écran résistif couplé à un petit volume d'adaptation. Ce type de terminaison se caractérise par un fonctionnement particulièrement bien adapté aux très basses fréquences pour les mesures sans écoulement d'air. L'intérêt de ce type de terminaison réside également dans son très faible encombrement comparativement aux terminaisons classiques dimensionnées pour ces fréquences.



Fig. 4 : Terminaison anéchoïque résistive

La figure 5 représente le coefficient de réflexion mesuré pour une terminaison anéchoïque adaptée à une gaine de section $0,3 \times 0,5 \text{ m}^2$. Dans cet exemple, le coefficient de réflexion est inférieur à 0,2 entre 30 Hz et 350 Hz. L'application de ce procédé est *a priori* adaptable à toute section de gaine.

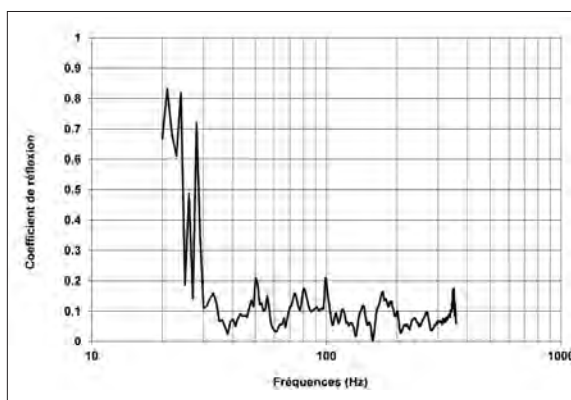


Fig. 5 : Coefficient de réflexion mesuré d'une terminaison anéchoïque pour gaine de section $0,3 \times 0,5 \text{ m}^2$

Mise en évidence de trois facteurs d'erreur

Dispersion des mesures en salle réverbérante

Une première phase de tests a consisté à réaliser plusieurs séries de mesures de pression acoustique en salle réverbérante avec et sans silencieux suivant la procédure décrite par la norme ISO 3741. Dans cette procédure, une mesure de puissance acoustique représente une moyenne réalisée sur au moins 6 positions de microphones avec un temps d'intégration minimum de 30 s.

Pour évaluer la dispersion de ces mesures, nous avons effectué des séries de 10 acquisitions successives sans modification du banc.

Il ne s'agit donc pas d'essais de répétabilité qui impliqueraient des démontages/remontages du silencieux en essais et un éventuel changement d'opérateur.

Ces mesures ont été réalisées pour deux modèles de silencieux de conception standard F2A (BS 600 et BS 1200), un silencieux à membrane dédié aux basses fréquences (BME 1200) et le conduit de substitution (conduit vide). Les écarts-types calculés pour chaque série de mesures sont présentés dans le tableau de la figure 6 pour les bandes de tiers d'octave comprises entre 50 Hz et 200 Hz.

Fréquence (Hz)	BME 1200	BS 1200	BS 600	Conduit vide
50	1.2	1.0	1.5	1.0
63	0.9	2.0	1.9	1.4
80	1.2	1.4	1.6	1.0
100	0.9	1.0	0.8	0.6
125	1.1	0.9	1.3	0.8
160	1.0	0.8	0.9	0.8
200	0.9	0.5	0.9	1.0

Fig. 6 : Ecarts-types sur la mesure de pression en salle réverbérante pour une série de 10 acquisitions pour trois modèles de silencieux et pour le conduit de substitution

Ces résultats révèlent une dispersion significative de la mesure de pression en salle réverbérante avec des valeurs de 1 à 2 dB. Sachant que cette mesure est effectuée deux fois,

avec et sans silencieux, pour déterminer la perte d'insertion, les écarts sont susceptibles de s'additionner.

Il apparaît donc que la seule dispersion liée à la mesure de pression acoustique en salle réverbérante dans cette gamme de fréquences donne des écarts-types du même ordre de grandeur que les écarts de reproductibilité estimés par la norme.

Variations du comportement de la source acoustique

La procédure de mesure de la perte d'insertion suppose de réaliser les deux mesures avec et sans silencieux sans modifier les conditions d'essais dont en particulier le niveau de la source acoustique. Or, cette dernière est généralement constituée d'un dispositif électro-acoustique comprenant un ou plusieurs haut-parleurs et une enceinte close arrière. Lorsque la veine d'essais est raccordée à une salle réverbérante et que le silencieux en essais est remplacé par le conduit de substitution (conduit vide), les coefficients de réflexion élevés en basses fréquences à l'extrémité de la veine d'essais sont à l'origine de résonances qui changent sensiblement l'impédance ou la charge acoustique «vue» par la source et modifient son comportement. Pour qualifier les variations du comportement de la source, nous avons réalisé des mesures de la puissance acoustique injectée dans la veine d'essais avec le doublet microphonique placé en aval du silencieux. Ces mesures de puissance sont comparées sur le graphe de la figure 7 en présence ou non d'un silencieux dans la conduite. Sur cet exemple, on relève des écarts sensibles entre les deux configurations dans certaines bandes d'octave (2 dB à 50 Hz et plus de 1 dB à 80 et 100 Hz). Ces écarts de puissance injectée impactent inévitablement la mesure de puissance à la sortie de la veine d'essais en salle réverbérante et constituent une source d'erreur supplémentaire.

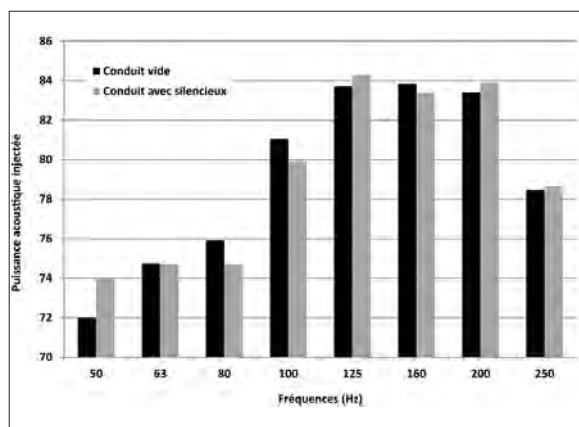


Fig. 7 : Comparaison des puissances acoustiques injectées dans la veine d'essais avec et sans silencieux

Pertes par rayonnement des conduits de substitution

Les silencieux à baffles sont classiquement réalisés à partir de tôles d'acier d'épaisseurs souvent inférieures au millimètre. Les phénomènes de couplages vibro-acoustiques qui accompagnent la propagation des ondes acoustiques basses fréquences se traduisent par des fortes vibrations des parois et un rayonnement acoustique des gaines. Ce rayonnement correspond à une perte d'une partie de la puissance acoustique qui transite dans les gaines.

L'installation dans une gaine vide d'une série de baffles absorbants peut modifier considérablement le couplage vibro-acoustique des parois de la gaine et donc le bilan de puissance dans la veine d'essais.

Nous avons mis ce phénomène en évidence à partir de mesures de la perte par transmission du conduit de substitution (conduit vide) sur l'installation d'essais avec terminaison anéchoïque (voir figure 3). Le conduit de 2,5 m est réalisé en tôle d'acier de 1 mm d'épaisseur. Cette mesure est comparée sur le graphe de la figure 8 avec le même conduit dont les parois sont traitées avec une masse bitumeuse de 15 kg/m² et un ensemble de raidisseurs.

Dans le cas du conduit non traité, de très fortes fluctuations de la perte par transmission apparaissent. Elles traduisent des réductions de la puissance acoustique transmise très localisées en fréquence mais également une augmentation de la puissance transmise entre 20 et 30 Hz.

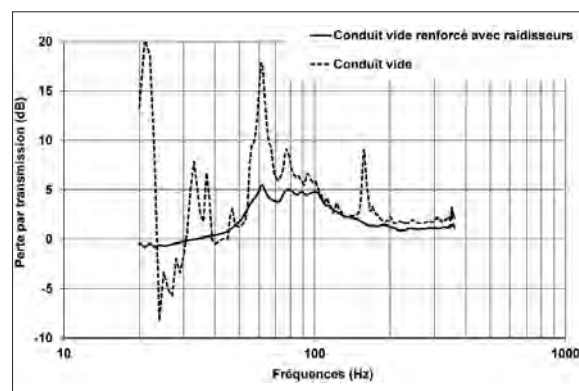


Fig. 8 : Mesure de la perte par transmission d'une gaine de 2,5 m en tôle d'acier de 1 mm et de la même gaine renforcée avec une masse bitumeuse de 15 kg/m² et un ensemble de raidisseurs

Dans la procédure de mesure de la perte d'insertion, lorsque le silencieux est en place, il est évident que la fixation des baffles sur les parois internes de la gaine va les rigidifier et modifier sensiblement le rayonnement des parois. Cet effet est bien mis en évidence par le fait que la gaine traitée (notamment raidie) se comporte de manière très différente avec une perte par transmission beaucoup plus faible que la gaine non traitée.

On peut noter que, pour les plus hautes fréquences, les deux courbes se rejoignent traduisant la disparition des phénomènes de couplages vibro-acoustiques.

Une méthodologie spécifique au domaine des basses fréquences

Pour améliorer la précision des mesures normalisées dans les basses fréquences, on peut envisager des solutions permettant de répondre à certains des problèmes que nous avons décrits précédemment.

Par exemple, J.G. Lilly [2] propose d'utiliser un pavillon de grandes dimensions pour connecter la veine d'essais à la salle réverbérante. Cette solution paraît intéressante mais il est probable que cela dégrade encore l'homogénéité du champ acoustique dans les basses fréquences de la salle réverbérante.

Il est également possible de limiter la dispersion des mesures en salle réverbérante en multipliant les points de mesures de la pression et en intégrant ces mesures sur des temps plus longs. Cela conduirait inévitablement à complexifier encore le banc d'essais car il faudrait pour cela disposer d'un plus grand nombre de microphones ou réaliser plusieurs mesures en déplaçant plusieurs fois les microphones disponibles.

Par contre, comment prendre en compte ou éviter les variations de la source acoustique ? Et comment éviter les erreurs dues à la variation du taux d'ondes stationnaires avec et sans silencieux ?

Ne faudrait-il pas plutôt admettre la singularité de la propagation des basses fréquences en conduit et redéfinir une méthodologie adaptée à la mesure dans ce domaine ?

Dans les deux premières bandes d'octave, la propagation acoustique ne concerne que le mode plan pour des conduits dont la plus grande dimension peut atteindre 1 m. Dans ce cas, la technique des doublets microphoniques permet de réaliser des mesures simples et fiables des différentes grandeurs qui caractérisent la propagation acoustique (puissances acoustiques amont et aval, coefficients de réflexion) et d'en déduire la perte par transmission et/ou la perte par insertion. Pour garantir une bonne précision de mesure, il est alors impératif d'utiliser une terminaison anéchoïque à l'extrémité de la veine d'essais. La mise en œuvre de cette méthode de mesure dédiée aux deux premières bandes d'octave impliquerait finalement de réaliser des adaptations relativement simples permettant de passer d'une configuration expérimentale à l'autre : la veine d'essais doit être déconnectée de la salle réverbérante et son extrémité équipée d'une terminaison anéchoïque et deux doublets microphoniques doivent être installés en amont et en aval du silencieux en essais (ou du conduit de substitution).

Par ailleurs, compte tenu des phénomènes de couplages vibro-acoustiques liés à la conception des gaines de ventilation, il est important de définir précisément l'objet à caractériser. En effet, s'il s'agit de déterminer les propriétés de baffles absorbants installés dans différentes configurations (différentes voies d'air par exemple), il faut sans doute privilégier des mesures comparatives de type pertes par insertion dans un conduit traité (raidi) pour ne pas prendre en compte les pertes par rayonnement du conduit. S'il s'agit de qualifier le silencieux complet, les baffles étant définitivement fixés dans la gaine, une mesure directe de type perte par transmission est probablement la mieux adaptée. Enfin, pour éviter les problèmes liés aux variations possibles de la source avec et sans silencieux, la meilleure méthode consiste probablement à déterminer la perte par insertion comme la différence des pertes par transmission mesurées avec et sans silencieux ou autrement dit de normaliser les mesures de la puissance transmise en aval par la puissance injectée en amont.

A titre d'illustration, le graphe de la figure 9 compare les mesures réalisées sur le banc d'essais normalisé (voir figure 2) et sur le banc adapté aux basses fréquences (voir figure 3). Dans le cas du banc normalisé, les deux courbes présentées donnent les extremums des valeurs obtenues sur une série de 10 mesures successives. Dans le cas des mesures réalisées sur le banc adapté aux basses fréquences, la dispersion des mesures a été estimée inférieure à 0,2 dB.

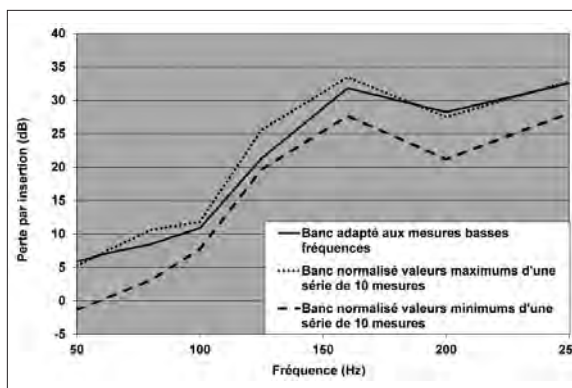


Fig. 9 : Exemples de caractérisation d'un silencieux à membrane (BME 1200) sur le banc normalisé et sur le banc adapté aux basses fréquences

Conclusions

Il existe en Europe et même aux Etats Unis peu de laboratoires ayant les capacités de mettre en application dans son intégralité la norme ISO 7235. Les moyens expérimentaux associés sont importants et les contraintes normatives complexes à respecter. Ces contraintes sont pour une bonne part liées à la recherche de précision dans le domaine particulier des basses fréquences. Le fait d'envisager une méthodologie dédiée aux deux premières bandes d'octave permettrait non seulement d'améliorer grandement la précision des mesures dans ce domaine mais conduirait également à une simplification des contraintes normatives pour les moyennes et hautes fréquences.

Dans la situation actuelle, il semble que la norme soit sujette à interprétations et rarement appliquée de façon rigoureuse alors que des rapports d'essais issus de laboratoires sont de plus en plus souvent exigés par les bureaux d'études. Cette difficulté d'application de la norme en basses fréquences notamment peut également représenter un frein à l'innovation qui dans le domaine de l'acoustique des réseaux CVC n'est pas très dynamique.

C'est précisément cette volonté d'innovation pour le traitement des nuisances basses fréquences qui nous a conduits avec F2A à entreprendre ce travail de recherche d'une méthodologie adaptée aux basses fréquences.

Références bibliographiques

- [1] J. Roland, «Evaluation of the errors in the measurements of silencers characteristics», *Journal of Sound and Vibration* (1981) 75(4), pp. 549-558
- [2] Jerry G. Lilly, «Suggested Modifications to ASTM Test Method E 477», *Sound & Vibration*, juin 2011
- [3] http://www.astm.org/SNEWS/JANUARY_2001/airc_jan01.html
- [4] <http://www.caice.co.uk/home/content/Lee Cunningham Partnership Attenuator Test Rig Brochure.pdf>
- [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