

Utilisation d'absorbeurs électroacoustiques actifs pour l'égalisation des salles aux basses fréquences

Hervé Lissek

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
Laboratoire de Traitement des Signaux LTS2 -
Groupe d'Acoustique
EPFL STI IEL LTS2
Station 11
CH-1015 Lausanne
Suisse
E-mail : herve.lissek@epfl.ch

Résumé

Les absorbeurs électroacoustiques sont des résonateurs à membrane actionnés par un moteur, par exemple un transducteur électrodynamique, et contrôlés à travers une boucle d'asservissement, de manière à modifier l'absorption acoustique de la membrane, et la rendre optimale sur une large bande de fréquence autour de sa résonance. Tirant profit du fait que les haut-parleurs conventionnels présentent une fréquence de résonance dans les basses fréquences, cette technique présente des avantages certains pour l'amortissement des modes propres aux basses fréquences dans les salles. Ce type de dispositif a des applications directes pour de nombreux problèmes acoustiques, comme l'égalisation de salles pour la diffusion de musique dans le registre grave, ou la réduction de l'exposition aux bruits basses fréquences venant de sources extérieures dans les habitations, entre autres exemples.

Dans ce papier, nous présentons le principe de dimensionnement d'un prototype d'absorbeur électroacoustique en vue de l'égalisation modale de la salle réverbérante de l'EPFL. Nous présentons ensuite les performances d'un ensemble de quatre prototypes conçus sur ce design, et mesurés dans la salle réverbérante de l'EPFL, avec différentes excitations sonores (bruit large bande stationnaire, sons purs de durées limitées, musique). Il est ainsi mis en évidence que ces quatre prototypes d'absorbeurs électroacoustiques, qui représentent à peine 0,1 % de la surface totale des parois de la salle, permettent une atténuation globale du niveau sonore SPL d'environ 8 dB dans la gamme [20 – 100 Hz], avec des atténuations modales individuelles pouvant atteindre 12 dB. Par ailleurs, la mesure des temps de décroissances modales, obtenues avec des excitations aux différentes fréquences de résonances de la salle, montre des réductions significatives pour tous les modes, pouvant atteindre 84 % de réduction du temps d'extinction des modes. Enfin, l'effet bénéfique des absorbeurs sur des sons fortement modulés, comme de la musique, est mis en évidence de manière qualitative.

Les absorbeurs acoustiques conventionnels (passifs) ont l'avantage d'être, en règle générale, bon marché et relativement simples d'utilisation. Cependant ils sont absolument inefficaces dans la partie basse des fréquences audibles [1]. Cette limitation des traitements acoustiques passifs a suscité de nombreuses recherches visant à développer des techniques de contrôle actif, qui ont abouti à certains concepts intéressants dans les dernières années [2], en particulier celui de haut-parleurs actifs à impédance acoustique contrôlable (techniques qualifiées généralement de « *direct impedance control* ») [3].

Dans un papier récent [4], le concept d'absorbeur électroacoustique a été proposé comme solution innovante pour l'absorption du son aux basses fréquences. Il s'agit d'un système comprenant un ou plusieurs haut-parleur(s) électrodynamique(s) en enceinte close, connecté(s) à un circuit électrique de charge (« *shunt* ») qui peut être aussi

bien passif qu'actif, le tout agissant comme un absorbeur acoustique autour de la résonance du haut-parleur (généralement dans les basses fréquences, en dessous de 100 Hz pour la plupart des haut-parleurs bas-médium du commerce). Le dispositif a été étudié expérimentalement dans un tube d'impédance (ondes planes en incidence normale), présentant un coefficient d'absorption proche de 1 sur une large bande de fréquences ([20 – 200 Hz]). Dans ce papier, nous présentons les résultats d'une expérience visant à évaluer les performances d'absorbeurs électroacoustiques dans une salle, en condition réelle d'utilisation. Ces performances seront présentées en termes d'amortissement de l'amplitude des modes propres de la salle, mais également en termes de réduction des temps d'extinction modaux. Les mesures ont été effectuées dans la salle réverbérante de l'EPFL, d'un volume de 215,6 m³, et les excitations acoustiques sont successivement des bruits large bande, des sons purs, et de la musique.

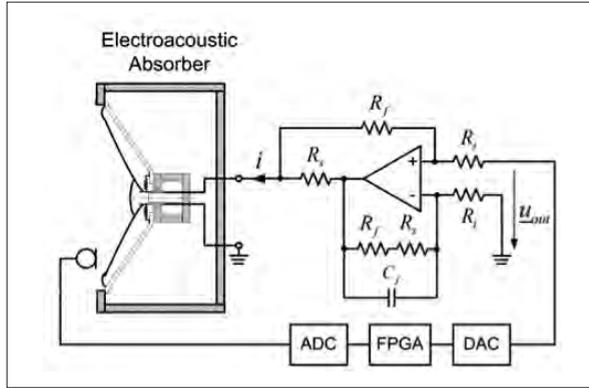


Fig. 1 : Schéma de principe d'un absorbeur électroacoustique (à gauche : schéma représentant une unité d'absorbeur électroacoustique avec un haut-parleur en enceinte close, un microphone et une boucle électronique d'asservissement en courant ; à droite : représentation synoptique du contrôle)

Dimensionnement d'un prototype d'absorbeur électroacoustique

Stratégie de contrôle

Le prototype d'absorbeur électroacoustique développé dans le cadre de cette étude est conçu selon le principe général présenté sur la figure 1. Ce dispositif correspond à un contrôle en rétroaction, avec un microphone captant une grandeur d'entrée, en l'occurrence la pression acoustique totale p_t sur la membrane du haut-parleur, alimentant un contrôleur implémentant une fonction de transfert $\Theta_p(\omega)$ (où $\omega = 2\pi f$ est la fréquence angulaire et f la fréquence), de manière à faire circuler dans la bobine électrique du haut-parleur le courant désiré $i = \Theta_p(\omega) p_t$.

Ce concept de contrôle diffère de celui présenté dans une précédente publication [5] dans la mesure où la pression mesurée par le microphone remplace ici la tension électrique mesurée aux bornes électriques du haut-parleur, mais l'idée générale de synthétiser une impédance acoustique cible à travers la fonction de transfert $\Theta_p(\omega)$ reste la même. Dans ce dispositif, l'impédance acoustique est ajustée à une cible donnée, en délivrant un courant au haut-parleur fonction complexe de la pression acoustique totale sur la membrane du haut-parleur. En écrivant la loi de Newton appliquée au système mécanique de la membrane suspendue, transformée dans le domaine fréquentiel, il vient :

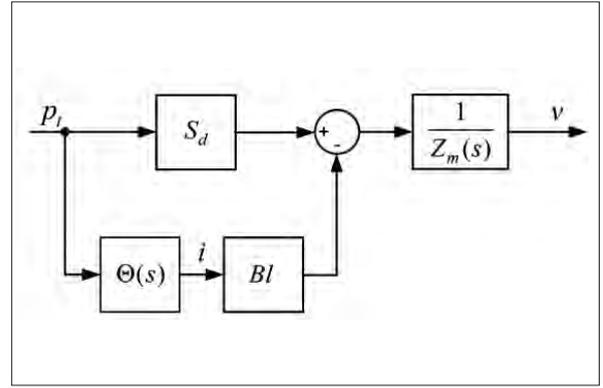
$$S_d p_t = Z_m(\omega) v + Bl \Theta_p(\omega) p_t \quad (1)$$

$$\text{où } Z_m(\omega) = R_{ms} + j\omega M_{ms} + \frac{1}{C_{ms}} + \frac{\rho c^2 S_d^2}{V_b}$$

est l'impédance mécanique totale du haut-parleur en enceinte close et en circuit ouvert, et les paramètres de l'Eq. (1) sont définis dans le tableau 1.

Il est ensuite aisé de déduire l'impédance acoustique complexe $Z_a(\omega)$ obtenue au niveau de la membrane du haut-parleur à partir de l'Eq. (1) comme :

$$Z_a(\omega) = \frac{p_t}{v} = \frac{Z_m(\omega)}{S_d - Bl \cdot \Theta_p(\omega)} \quad (2)$$



Paramètres	Description	Valeur	Unité
M_{ms}	Masse mobile	14,7	g
R_{ms}	Résistance mécanique	1,31	N.s.m ⁻¹
C_{ms}	Compliance mécanique	242,3	µm.N ⁻¹
S_d	Surface de la membrane	151	cm ²
Bl	Facteur de force	6,85	N.A ⁻¹
V_b	Volume de l'enceinte	10	dm ³
ρ	Masse volumique de l'air	1.2	kg/m ³
c	Célérité du son dans l'air	344	m.s ⁻¹

Tabl. 1 : Paramètres en petits signaux du haut-parleur Peerless SDS-P830657 utilisé dans le prototype d'absorbeur électroacoustique

La consigne $\Theta_p(\omega)$ permet donc de modifier la fonction fréquentielle représentant l'impédance acoustique présentée par la membrane du haut-parleur vis-à-vis des champs acoustiques extérieurs. La section suivante détaille la méthodologie pour régler ce contrôle.

Impédance acoustique cible et réglage du contrôleur

Dans cette étude, on vise à adapter l'impédance acoustique de la membrane du haut-parleur à une certaine valeur de résistance acoustique R_{at} . La fonction de transfert $\Theta_p(\omega)$ à réaliser par le contrôleur, permettant d'obtenir l'impédance cible $Z_a = R_{at}$, peut être facilement déduite de l'Eq. (2) :

$$\Theta_p(\omega) = \frac{S_d R_{at} - Z_m(\omega)}{Bl \cdot R_{at}} \quad (3)$$

Réglage de l'absorbeur électroacoustique et implémentation

Le réglage de l'impédance cible dépend du rapport entre la surface de traitement actif S_{actif} sur la surface totale S_{tot} des parois de la salle, comme le suggère une étude récente [6]. Ainsi, alors que la valeur idéale d'impédance acoustique vaut $Z_c = \rho c$ pour un absorbeur au bout d'un tube d'impédance de même section droite, cette valeur cible est affectée d'un facteur, dépendant simplement du rapport de surfaces S_{actif}/S_{total} . La valeur de résistance acoustique cible choisie est $R_{at} = 0,25 \rho c$.

1- En fait, nous avons implémenté une version filtrée passe-bande de R_{at} pour assurer la stabilité du contrôle.

La fonction de transfert Θ_p est ensuite implémentée sur un contrôleur temps-réel National Instruments CompactRIO® basé sur des processeurs FPGA. La tension délivrée par le microphone est ainsi convertie numériquement à travers un module A/D NI 9215, et la sortie du contrôleur est convertie analogiquement grâce à un module D/A NI 9263. En dernier étage du contrôle, une source de courant contrôlée en tension est conçue selon le schéma de la figure 1 afin d'alimenter la bobine du haut-parleur avec le courant voulu.

Avant de réaliser les tests en salle réverbérante, les performances acoustiques sont d'abord évaluées en tube d'impédance pour s'assurer que nous réalisons effectivement l'impédance acoustique cible, suivant la norme ISO 10534-2 [3,4]. La figure 2 présente l'impédance acoustique (en amplitude et en phase) mesurée en tube d'impédance avec l'absorbeur électroacoustique en terminaison de tube, d'abord en circuit ouvert (sans contrôle) puis avec le contrôle présenté dans l'Eq. (2) (avec contrôle).

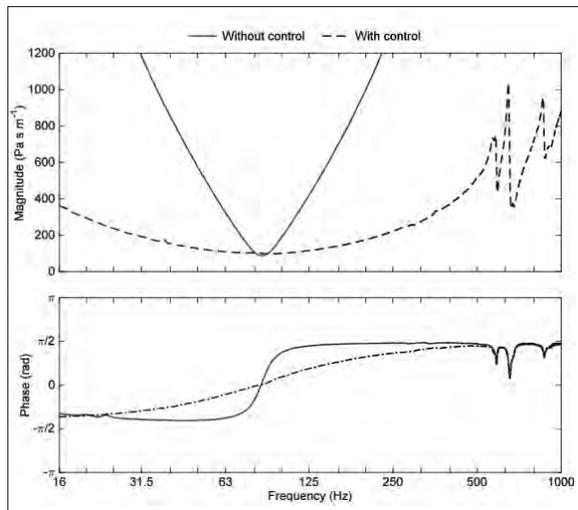


Fig. 2 : Impédance acoustique (amplitude et phase) mesurée sur un échantillon d'absorbeur électroacoustique en terminaison d'un tube d'impédance : en circuit ouvert (ligne pleine) et avec contrôle (pointillés)

Il apparaît que le contrôle permet bien de réaliser une impédance acoustique proche de $0,25 \rho c$ sur une large bande de fréquences, approximativement entre 20 et 150 Hz.

Évaluation des effets des prototypes sur les modes propres d'une salle

Dispositif expérimental

Chaque prototype d'absorbeur électroacoustique est composé d'une enceinte en MDF de dimensions 620 mm x 300 mm x 300 mm, comprenant quatre haut-parleurs Peerless SDS-P830657 situés sur deux faces adjacentes, et un microphone unique captant la pression acoustique totale pour le groupe de quatre haut-parleurs. Chaque haut-parleur du groupe de 4 est contrôlé individuellement avec son propre contrôleur/amplificateur selon le schéma de la figure 1. L'enceinte globale d'un prototype est-elle même compartimentée en quatre sous-volumes V_b (voir le schéma de la figure 3). Quatre prototypes identiques ont été construits selon ce modèle pour l'étude, représentant une surface totale d'absorbeurs électroacoustiques (somme des surfaces des 4x4 haut-parleurs) de 0,24 m².

Les performances des absorbeurs électroacoustiques pour atténuer les effets des modes propres ont été testées dans l'environnement contrôlé de la salle réverbérante de l'EPFL (volume : 215,6 m³, surface totale des parois : 226,9 m²). La surface effective d'absorbeur électroacoustique représente donc 0.11 % de la surface totale de la salle. C'est pourquoi, l'impédance cible assignée à chaque absorbeur électroacoustique vaut $R_{at} = 0.25 \rho c$, correspondant à la résistance acoustique optimale réalisable avec la surface totale d'absorbeur dans la salle [6].

Afin de réduire les effets dus à la réverbération, quatre panneaux absorbants recouverts de mousse polyuréthane formés en dièdres de 5 cm de hauteur (surface totale d'absorption : 12,8 m²) ont été introduits dans la salle réverbérante (voir Figure 4) pendant l'ensemble des mesures (sans et avec absorbeurs électroacoustiques).

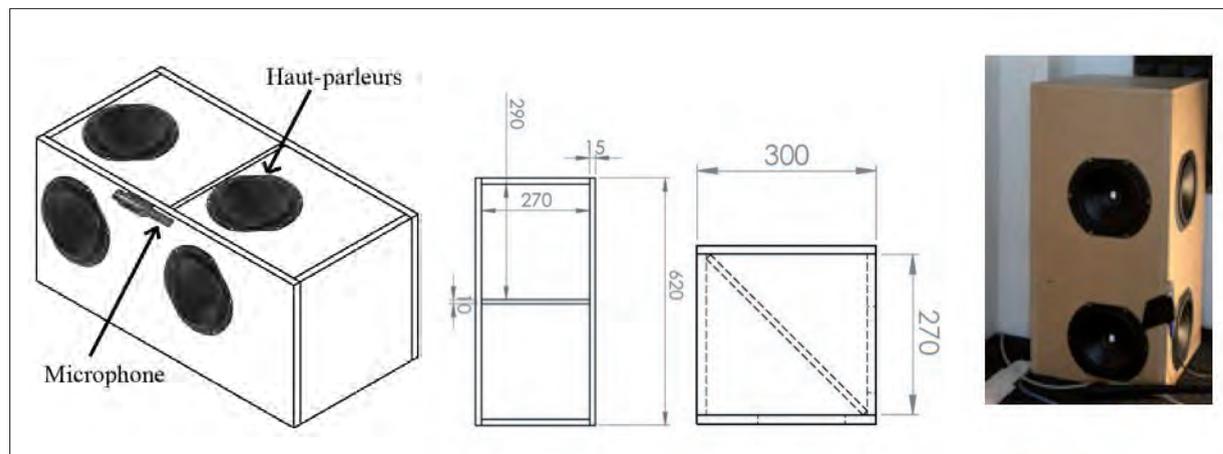


Fig. 3 : Trois dessins de gauche : schémas du prototype d'absorbeur électroacoustique (vue isométrique, vue de face, vue du haut) ; image de droite : photo d'un prototype construit

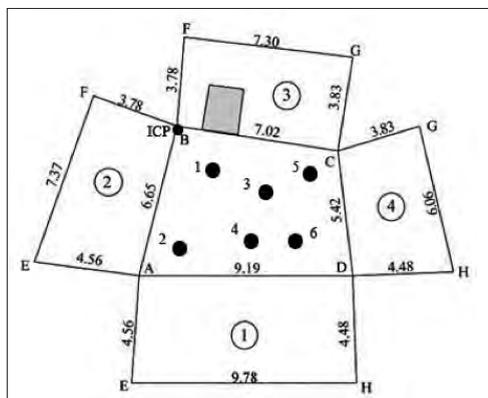


Fig. 4 : À gauche : représentation éclatée de la salle réverbérante et position des points de mesure ; à droite : photographie du dispositif expérimental (deux absorbeurs électroacoustiques peuvent être identifiés aux deux visibles sur l'image, désignés comme les coins C et D sur le plan de gauche)

Le dispositif expérimental comprend les éléments suivants :

Pour l'identification des modes propres :

- un analyseur multicanal (Bruel and Kjaer Type 3160 - Pulse),
- un microphone ICP (PCB Piezotronics type 130E20), placé à 0,83 m au-dessus du coin désigné B,
- un *subwoofer* (Velodyn SPL-800i), placé à proximité du coin B.

Pour la mesure des durées d'extinction des modes et l'enregistrement d'extraits musicaux :

- un carte-son M-Audio M-Track Eight 8-channel,
- six microphones électrodynamiques (Beyerdynamic M101-N), disposés selon le plan de la Fig.4,
- un *subwoofer* (Velodyn SPL-800i), placé à proximité du coin B.

Pour l'identification des modes propres, le générateur délivre au *subwoofer* un signal de bruit limité en fréquences (bande-passante : 10 – 210 Hz) et l'analyseur calcule l'autospectre du signal de pression acoustique capté par le microphone désigné « ICP » (en Pa², résolution fréquentielle : 31,25 mHz).

Pour l'évaluation des temps d'extinction des modes propres, le signal d'excitation est une succession de sinus purs limités dans le temps (20 secondes de son pur, suivi de 20 secondes de silence) aux différentes fréquences propres de la salle, préalablement identifiées sans, et avec absorbeurs. L'étude se limite aux 24 premiers modes propres, contenus dans la bande fréquentielle [20-100 Hz].

Identification des modes propres

Dans un premier temps, les niveaux de pression acoustique sont évalués à la position de microphone « ICP ». La figure 5 montre les résultats de la mesure, exprimés en termes de niveau de pression acoustique (en dB re. 20 μ Pa), sans les absorbeurs (en pointillés noirs) et avec les 4 prototypes d'absorbeurs électroacoustiques (en gris). Cette mesure permet d'identifier les vingt-quatre premiers modes propres en dessous de 100 Hz. Les atténuations de l'amplitude pour chaque mode sont représentées sur la figure 6.

Nous pouvons observer que les amplitudes de chaque mode propre sont réduites, entre 2 et 12 dB. Par ailleurs, l'atténuation globale avec les quatre absorbeurs (dans le cas d'une excitation de type bruit blanc filtré passe-bande) sur la bande [20 – 100 Hz] est de presque 8 dB. Il est aussi intéressant d'observer que les modes 18 et 19 sans les absorbeurs (correspondant à 85,0 Hz et 86,1 Hz) semblent fusionner avec les absorbeurs pour ne former qu'un seul mode (appelé 18) à 85,4 Hz. Le même phénomène se produit avec les modes 20 et 21 sans absorbeurs (88 Hz et 90 Hz) résultant dans le mode 20 à 89 Hz avec les absorbeurs. Il est par ailleurs important de noter que ces résultats ont été obtenus avec seulement 0,24 m² de surface absorbante, pour une salle de volume 215,6 m³ et de surface totale 226,9 m².

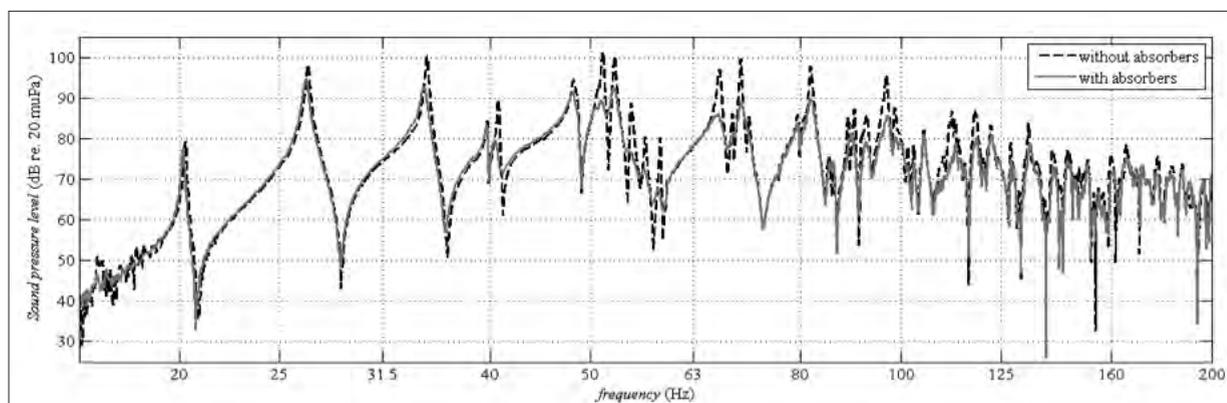


Fig. 5 : Niveaux de pression acoustiques mesurés à la position de microphone « ICP » (dB re. 20 μ Pa) (en pointillés noirs : sans absorbeur électroacoustique ; en gris : avec 4 prototypes d'absorbeurs électroacoustiques)

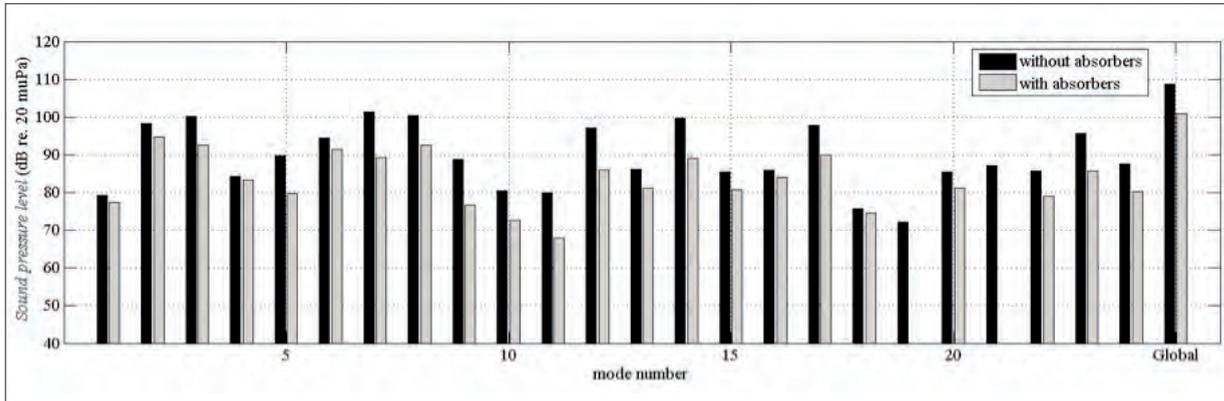


Fig. 6 : Amplitudes des vingt-quatre premiers modes de salle sans et avec les absorbeurs électroacoustiques (in dB) mesurées à la position de microphone "ICP" (barres noires : sans absorbeur électroacoustique ; en gris : avec quatre prototypes d'absorbeurs électroacoustiques)

Évaluation des temps d'extinction modaux

La persistance temporelle des modes propres après extinction d'une source semble être un facteur important de la gêne perçue dans une salle sujette à des modes propres marqués [7]. L'expérience suivante a pour objectif de mesurer l'effet des absorbeurs électroacoustiques sur les temps d'extinction des 24 premiers modes de la salle réverbérante dans la bande [20 – 100 Hz].

L'expérience précédente nous a permis d'identifier les différentes fréquences propres dans la salle, d'abord sans, puis avec les absorbeurs électroacoustiques (ces fréquences sont par ailleurs modifiées par la présence des absorbeurs). L'évaluation des temps d'extinction de chaque mode est effectuée en excitant la salle avec des salves de sons purs (20 secondes de sons purs, suivies de 20 secondes de silence) à chaque fréquence propre identifiée, d'abord sans absorbeur électroacoustique, puis avec 4 absorbeurs électroacoustiques dans les 4 coins de la salle. Un exemple d'enregistrement des formes d'ondes correspondantes est donné sur la figure 7 (en noir : sans absorbeur ; en gris ; avec quatre absorbeurs électroacoustiques).

La figure 7b) illustre la décroissance de niveau sonore (normalisé au niveau durant le régime stationnaire) du mode #11 mesurée à la position de microphone #3. Il est mis en évidence que le niveau de pression acoustique décroît linéairement avec le temps. Ainsi, pour chaque position de microphone, la durée d'extinction de chaque mode peut être déduite de la pente de la courbe en dB, de manière analogue à la durée de réverbération dans les moyennes et hautes fréquences [1].

Afin de comparer les temps d'extinctions modaux, sans et avec absorbeurs électroacoustiques, nous allons définir une grandeur MT_{60} (en secondes), correspondant au temps que met le niveau sonore pour décroître de 60 dB après l'extinction de la source. Cependant, la dynamique des mesures de niveaux de pression acoustique, pour chaque position de microphone et pour chaque mode pendant les décroissances, n'atteint pratiquement jamais 60 dB. La grandeur MT_{20} , qui représente le triple du temps de décroissance sur 20 dB (par analogie avec la durée de réverbération RT_{20}), sera donc calculée à la place.

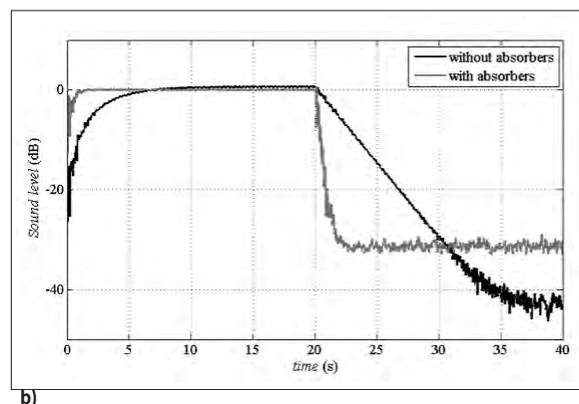
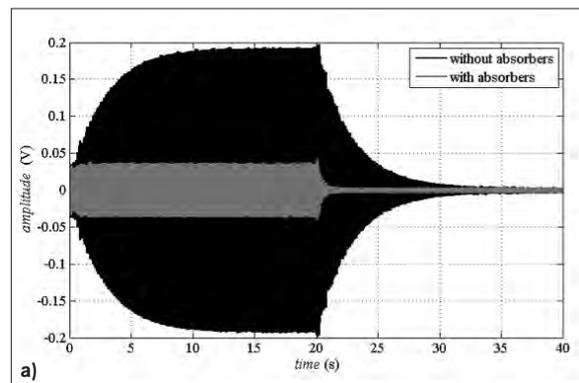


Fig. 7 : a) enregistrements à la position de microphone #3 d'un son pur de durée limitée correspondant au mode #11 (autour de 58 Hz) ; b) enveloppe de la forme d'onde représentée dans une échelle en dB (relative à l'amplitude de la forme d'onde dans la phase stationnaire)

La figure 8, page suivante, présente les différents MT_{20} moyennés sur toutes les positions de microphones, pour chaque mode, sans absorbeur électroacoustique (en noir) et avec (en gris).

La totalité des temps d'extinctions modaux sont significativement réduits, avec un maximum atteint sur le mode 11 (à 58 Hz), passant de 20,2 s sans absorbeurs à 3,2 s avec les absorbeurs. Globalement, les réductions absolues vont de 1,7 s pour le mode 16 (réduction relative de 19 %) à 17,0 s sur le mode 11 (réduction relative de 84 %).

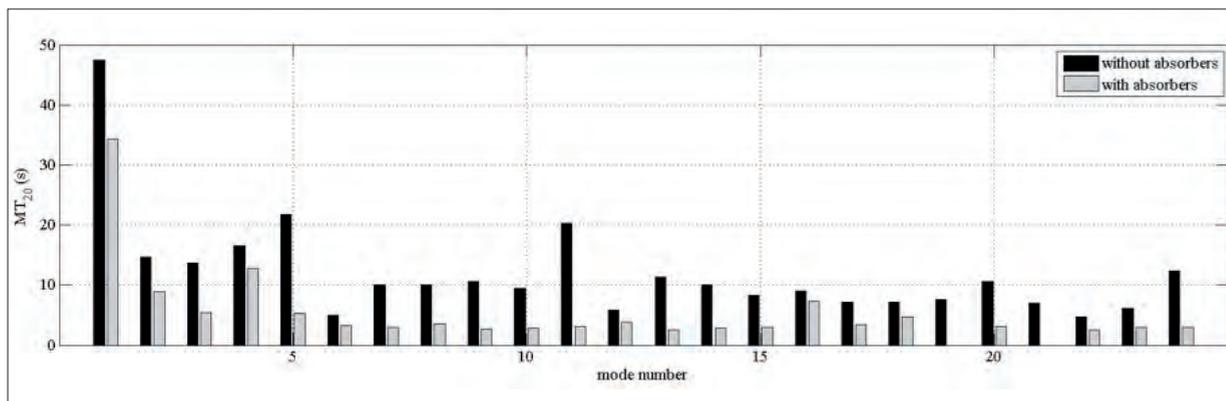


Fig. 8 : effet des absorbeurs électroacoustiques sur les durées d'extinction des modes : représentation des MT20 sans (noir) et avec absorbeurs électroacoustiques (gris)

Enregistrement de musique

Afin de vérifier l'effet bénéfique des absorbeurs sur la reproduction de musique aux basses fréquences, une approche qualitative a été menée, préalable à une future étude psychoacoustique plus approfondie. Un extrait de l'introduction de contrebasse du morceau « Fever » de Peggy Lee [8] est diffusé par le subwoofer et enregistré à l'aide des six microphones décrits sur la figure 4. L'enregistrement est réalisé successivement sans absorbeurs, puis avec quatre absorbeurs électroacoustiques, dans les mêmes conditions de diffusion. La figure 9 présente un exemple d'enregistrement de ces formes d'ondes à la position de microphone #5. On peut observer que le premier effet des absorbeurs est une nette diminution (d'un facteur 2 environ) de l'amplitude du signal mesuré à cette position de microphone.

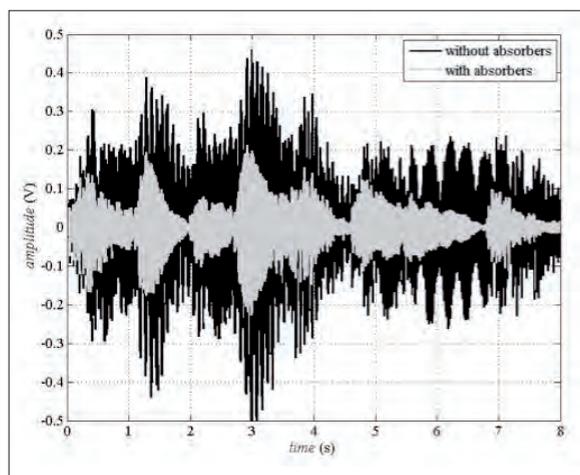


Fig. 9 : Formes d'ondes enregistrées à la position de microphone #5 lors de la diffusion de l'intro du morceau « Fever » de Peggy Lee, sans absorbeur (traits noirs) et avec absorbeurs électroacoustiques (traits gris).

Cependant l'effet le plus manifeste concerne la modulation du signal, en particulier dans la partie comprise entre 5 et 7 secondes sur la figure 9, pour laquelle l'enregistrement sans absorbeur présente une forte modulation, qui peut être interprétée comme un battement, disparaissant complètement avec les absorbeurs électroacoustiques.

Une écoute qualitative confirme ce phénomène (une centaine de personnes extérieures au laboratoire ont eu la possibilité de visiter l'installation de manière informelle) : sans absorbeurs, très peu d'auditeurs reconnaissent le thème à la basse en « aveugle » (moins de 5 sur 100), alors qu'environ la moitié des auditeurs ont pu nommer le morceau sans hésiter avec les absorbeurs électroacoustiques.

Conclusions

La campagne de mesures menée en salle réverbérante équipée de quatre prototypes d'absorbeurs électroacoustiques a permis de mettre en évidence les performances de ces dispositifs dans des conditions d'utilisation réalistes (bien que la salle d'essai, utilisée pour faciliter la mise en évidence des modes propres, ne soit évidemment pas adaptée à la diffusion de musique). Les principales observations que nous pouvons faire à ce stade sont :

- Les quatre absorbeurs électroacoustiques, représentant seulement 0,1 % de surface de traitement dans la salle, sont capables d'obtenir une égalisation des réponses en fréquence dans la salle, en particulier dans les coins où la réponse est la plus chahutée : l'amortissement significatif des différentes amplitudes des modes (ici la réduction maximale d'amplitude atteint 12,2 dB) peut ainsi permettre d'améliorer la qualité de diffusion du son dans les basses fréquences dans la salle réverbérante, et a fortiori dans une salle d'écoute plus conventionnelle (comme un home studio par exemple) ;
- Les quatre absorbeurs permettent de réduire significativement les temps d'extinction modale : sur certains modes, les durées de décroissance peuvent passer de 20 secondes sans les absorbeurs, à 3 secondes avec les absorbeurs. La réduction la plus significative se produit pour le mode 11 (à 58 Hz) avec une réduction relative de 84 % entre la situation sans et avec absorbeurs.

La diffusion de musique est améliorée avec l'utilisation des quatre absorbeurs électroacoustiques, ce qui peut s'observer qualitativement sur les formes d'ondes enregistrées lorsque le subwoofer diffuse de la musique enregistrée.

Les prototypes développés pour cette étude vont désormais être testés dans des conditions d'écoute plus réalistes (salle d'écoute), dans un premier temps de manière objective, en reproduisant le protocole expérimental présenté dans ce papier, et dans un deuxième temps de manière perceptive, en cherchant à évaluer l'effet de l'amortissement modal sur la perception de la qualité de rendu de la musique aux basses fréquences, auprès d'un panel d'auditeurs.

Remerciements

Ce travail a été financé par la Commission pour la Technologie et l'Innovation (CTI) de la confédération Suisse, sous le nom de projet INTERACTS, contrat n°: 14220.1 PFNM-NM. L'auteur tient à remercier en outre ses collaborateurs Sami Karkar et Étienne Rivet, ainsi que les partenaires du projet, les sociétés Goldmund et Relec, et l'HEPIA de Genève pour leur collaboration.

Références bibliographiques

- [1] H. Kuttruff, *Room acoustics*, New York : Spon Press, 2000
- [2] M. Melon, P. Herzog, A. Sittel and A.-M. Galland, "One dimensional study of a module for active/passive control of both absorption and transmission", *Applied Acoustics*, vol. 73, no. 3, pp. 234-242, 2012
- [3] R. Boulandet, H. Lissek, "Toward broadband electroacoustic resonators through optimized feedback control strategies", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 333, no. 20, pp.s 4810-4825, 2014
- [4] H. Lissek, R. Boulandet, and R. Fleury, "Electroacoustic absorbers : bridging the gap between shunt loudspeakers and active sound absorption", *J. Acoust. Soc. Am.*, 129 (5), pp. 2968-2978, 2011
- [5] H. Lissek, R. Boulandet, E. Rivet and I. Rigas, "Assessment of active electroacoustic absorbers as low-frequency modal dampers in rooms", *Proc. of Intersound 2012*, New-York City, USA, August 19-22, 2012
- [6] S. Karkar, E. Rivet, H. Lissek, D. Strobino, A. Pittet, V. Adam and A. Roux, "Electroacoustic absorbers for the low-frequency modal equalization of a room : what is the optimal target impedance for maximum modal damping, depending on the total area of absorbers?", *Proc. of Forum Acusticum 2014*, Krakow, Poland, September 7-12, 2014
- [7] B.M. Fazenda, M. Stephenson, and A. Goldberg, "Perceptual thresholds for the effects of room modes as a function of modal decay", *J. Acoust. Soc. Am.*, 137 (3), pp 1088-1098, 2015
- [8] P. Lee, E. Cooley and J. Davenport, "Fever", (album : "Things are Swingin'"), Capitol Records (1959).