

Les absorbeurs électroacoustiques: un concept unique pour différentes stratégies de contrôle actif d'impédance acoustique

Hervé Lissek¹

¹Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, STI IEL LEMA, Station 11, CH-1015, Lausanne, Suisse, herve.lissek@epfl.ch

Des propriétés acoustiques variables peuvent être imposées à la face parlante d'un transducteur électroacoustique grâce à de simples stratégies de contrôle, parmi lesquelles figurent les techniques dites de transducteurs shuntés (court-circuit, charge électrique passive variable, dispositifs à résistance négative ou contrôle d'impédance acoustique hybride, combinant deux contre-réaction, l'une en pression et l'autre en vitesse). Ce papier présente la théorie sous-jacente unifiant ces différentes stratégies, introduisant le concept d'absorbeur électroacoustique. Les performances de ces différents dispositifs seront illustrées par des simulations numériques et des résultats expérimentaux. D'autres paramètres seront étudiés permettant la comparaison des différentes stratégies, mettant en perspective les développements futurs envisagés pour ces techniques.

1 Introduction

Quelques décennies après le premier brevet portant sur un système de contrôle actif du bruit [1], la description formelle du concept d'absorption du son par des moyens électroacoustiques peut être attribuée à Olson et coll., qui présenta un concept de contre-réaction de la pression devant un haut-parleur permettant d'obtenir un absorbeur acoustique avec un transducteur électroacoustique [2]. Les différents concepts d'absorption acoustique active à l'aide de moyens électroacoustiques reposent majoritairement sur des stratégies de feedback, portant soit sur la pression acoustique [3], soit sur la vitesse vibratoire de l'actionneur [4, 5], soit enfin sur une combinaison des deux [6].

L'actionneur électroacoustique est un élément central des performances des systèmes de contrôle actif, et la maîtrise de sa réponse est indispensable pour l'optimisation des résultats de contrôle. Les algorithmes de contrôle ne tiennent cependant pas toujours bien compte de la dynamique de ces transducteurs, ce qui peut être préjudiciable dans bien des cas aux performances globales. Il est toujours possible d'améliorer par design le comportement de l'actionneur dans une bande de fréquences souhaitée, par exemple en dimensionnant des enceintes ou des circuits acoustiques spécifiques, mais les performances restent limitées en fréquence. Il est donc indispensable de développer des techniques versatiles, incluant des modèles dynamiques du transducteur, pour un meilleur contrôle de l'actionneur [5].

Dans ce papier, nous présentons différents concepts de contrôle d'impédance acoustique basés sur des contre-réactions, en mettant en évidence les analogies formelles entre ces différentes stratégies, introduisant le concept d'absorbeur électroacoustique. Les performances obtenues par simulation et leur évaluation expérimentale sont ensuite présentées, permettant de formuler des conclusions générales sur le concept d'absorbeur électroacoustique et des remarques particulières quant à la réalisation de tels dispositifs.

2 Les absorbeurs électroacoustiques

Dans ce qui suit, nous nous intéressons au cas particulier du haut-parleur électrodynamique à bobine mobile en enceinte close, dont la face parlante est connectée à un guide d'ondes de section adaptée. Nous nous proposons d'étudier l'influence de différentes configuration de charge du dipôle électrique, tout d'abord avec des charges passives (des résistances en l'occurrence), puis des résistances négatives (par ailleurs équivalent du principe de contre-réaction motionnelle), ou des contre-réactions combinées de la pression acoustique et de la vitesse vibratoire de la face parlante du transducteur, présentées comme des charges électriques du transducteur. L'ensemble formé par le haut-parleur, son conditionnement acoustique (l'enceinte acoustique) et la charge électrique sera appelé par la suite absorbeur électroacoustique (EA). Dans la suite du papier, nous exprimerons les grandeurs acoustiques comme des fonction de la variable de Laplace $s = j\omega$, où ω désigne la fréquence angulaire.

2.1 Propriétés du haut-parleur électrodynamique

Un haut-parleur électrodynamique est un système linéaire dont le grandeurs dynamiques (tension $U(s)$ et intensité électrique $I(s)$, pression acoustique totale à la face parlante $P(s)$, et vitesse vibratoire de la membrane $V(s)$) satisfont le système d'équations différentielles suivant :

$$\begin{cases} SP(s) = -\left(s \cdot M_{ms} + R_{ms} + \frac{1}{sC_{ms}} \right) V(s) - (Bl)I(s) \\ U(s) = -(Bl)V(s) + (R_e + s \cdot L_e)I(s) \end{cases} \quad (1)$$

où M_{ms} , R_{ms} et C_{ms} sont les masse, résistance et compliance mécaniques équivalentes de la partie mobile du transducteur, incluant les impédances de rayonnement (par exemple la compliance équivalent de l'enceinte de volume V_b , $C_{mb} = V_b / \rho c^2 S^2$, où ρ est la masse volumique de l'air, c la célérité des ondes sonores dans l'air, et S la surface de

la membrane), R_e et L_e , les résistance et inductance électriques, et Bl le facteur de force du moteur.

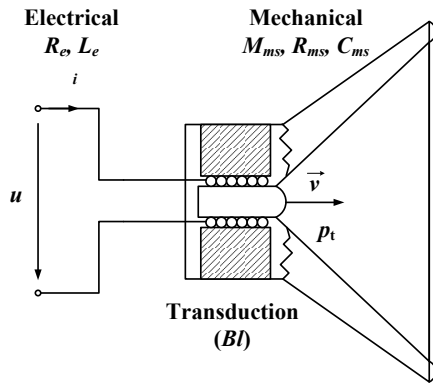


Figure 1: schéma du haut-parleur électrodynamique

Indépendamment des conditions de charge de l'entrée électrique du transducteur, l'admittance acoustique présentée par la face parlante au milieu peut être définie par:

$$Y(s) = -\rho c \frac{V(s)}{P(s)} \quad (2)$$

En reprenant le système d'équation (1), il est toujours possible d'écrire l'admittance du haut-parleur comme une fonction du rapport $U(s)/I(s)$, que nous détaillerons dans la suite. Ainsi toute charge de l'accès électrique du haut-parleur est susceptible de modifier l'admittance acoustique de sa face parlante. La connaissance de l'admittance acoustique permet alors de calculer le coefficient d'absorption $\alpha(s)$ présenté par le transducteur (sous incidence normale) selon :

$$\alpha(s) = 1 - \left| \frac{1 - Y(s)}{1 + Y(s)} \right|^2 \quad (3)$$

L'équation (3) indique que le choix de la charge électrique aux bornes du transducteur, c'est-à-dire la fonction de transfert $H(s)$ chargeant le haut-parleur, conditionne ses performances en absorption. Nous allons détailler dans ce qui suit les formes que prend cette fonction de transfert pour différents cas de contrôle d'impédance acoustique.

2.2 Formulation de l'absorbeur électroacoustique

Nous considérons dans ce qui suit le cas général pour lequel le haut-parleur est alimenté par une source de tension $U_s(s)$, combinaison linéaire des contre-réactions appliquées au transducteur, et de résistance interne R_s .

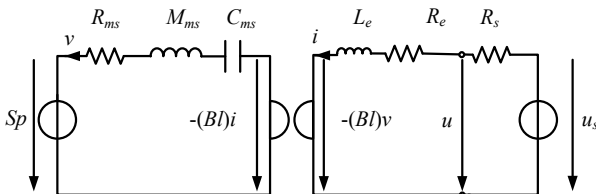


Figure 2 : représentation sous forme de circuit du haut-parleur électrodynamique alimenté par une tension $U_s(s)$

La tension $U(s)$ aux bornes du haut-parleur est alors une combinaison linéaire :

- (1) d'une tension de contre-réaction portant sur la vitesse vibratoire de la face parlante,
- (2) d'une tension de contre-réaction portant sur la pression acoustique totale devant la face parlante,
- (3) d'une tension aux bornes d'une résistance (soit une résistance de shunt, soit la résistance de source de l'amplificateur aux bornes du haut-parleur).

Ainsi, la tension totale alimentant le haut-parleur peut s'écrire comme:

$$U(s) = U_s(s) - R_s \cdot I(s) = \Gamma_v \cdot V(s) + \Gamma_p \cdot P(s) - R_s \cdot I(s) \quad (4)$$

où Γ_v [$V \cdot m^{-1} \cdot s$] et Γ_p [$V \cdot Pa^{-1}$] représentent les gains des contre-réactions en vitesse vibratoire et en pression acoustique, incluant la sensibilité des capteurs correspondants.

L'équation (4) permet donc de réduire d'un degré de liberté le système d'équations (1), et la formulation de l'admittance normalisée $Y(s)$ peut donc en être dérivée, prenant une forme relativement complexe dans le cas générale. Après simplifications, en particulier en se plaçant dans une gamme de fréquences satisfaisant les conditions:

$$f < f_e = \frac{1}{2\pi} \frac{R_e + R_s + \frac{\Gamma_p Bl}{S}}{L_e} \quad (5)$$

$$f < f_{me} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{R_e + R_s}{L_e} + \frac{R_{ms}}{M_{ms}} \right)$$

nous pouvons déduire la forme générale de l'admittance normalisée selon (l'indice EA signifiant absorbeur électroacoustique, et m signifiant une impédance mécanique) :

$$Y(s) \approx Z_{mc} \cdot \frac{s}{s^2 M_{mAE} + s R_{mAE} + (C_{mAE})^{-1}} \quad (6)$$

avec $Z_{mc} = \rho c S$, équivalent mécanique de l'impédance caractéristique de l'air à la face parlante du haut-parleur, et:

$$\begin{cases} M_{mAE} = M_{ms} \cdot \frac{(R_e + R_s)}{(R_e + R_s) + \Gamma_p \frac{Bl}{S}} \\ R_{mAE} = \frac{[(R_e + R_s) R_{ms}] + \frac{L_e}{C_{ms}} + Bl(Bl + \Gamma_v)}{(R_e + R_s) + \frac{\Gamma_p Bl}{S}} \\ C_{mAE} = C_{ms} \cdot \left[1 + \frac{\Gamma_p \cdot Bl}{S(R_e + R_s)} \right] \end{cases} \quad (7)$$

Ainsi, le fait d'appliquer des contre-réactions en pression ou en vitesse vibratoire, ou de court-circuiter le haut-parleur avec une résistance de shunt, ou toute combinaison linéaire de ces derniers, aboutit à une modification des paramètres du résonateur acoustique représenté par la face parlante du haut-parleur. Les propriétés de l'absorbeur électroacoustique, f_{AE} sa fréquence de résonance, r_{AE} sa résistance à la résonance, et Q_{AE} son facteur de qualité, peuvent s'exprimer selon :

$$\left\{ \begin{aligned} f_{AE} &= \frac{1}{2\pi\sqrt{C_{mAE} \cdot M_{mAE}}} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{C_{ms} \cdot M_{ms}}} = f_s \\ r_{mAE} &\approx \frac{1}{Z_c} \cdot \frac{R_{ms}(R_e + R_s) + \frac{L_e}{C_{ms}} + Bl(Bl + \Gamma_v)}{S(R_e + R_s) + \Gamma_p Bl} \\ Q_{mAE} &\approx 2\pi \frac{\sqrt{M_{ms}/C_{ms}}}{R_{ms}(R_e + R_s) + \frac{L_e}{C_{ms}} + Bl(Bl + \Gamma_v)} \end{aligned} \right. \quad (8)$$

Il est intéressant de constater que l'application d'un tel contrôle d'impédance acoustique n'affecte pas, dans le cas général, la fréquence de résonance f_{AE} du dispositif actif, qui est sensiblement égale à f_s , celle du haut-parleur sans contrôle (ou en circuit ouvert). L'intérêt majeur du concept est de pouvoir agir à la fois sur la valeur de résistance à la résonance, c'est-à-dire le coefficient d'absorption, et sur le facteur de qualité, donc la bande passante du contrôle.

2.3 Charge électrique équivalente

Ainsi qu'il l'a été mentionné précédemment, il est toujours possible d'exprimer l'admittance acoustique de l'absorbeur électroacoustique à l'aide d'une fonction de transfert $H(s)$, en exprimant la relation formelle :

$$\begin{aligned} U(s) &= \Gamma_v \cdot V(s) + \Gamma_p \cdot P(s) - R_s \cdot I(s) \\ &= -H(s) \cdot I(s) \end{aligned} \quad (9)$$

Les équations du système (1) peuvent être exprimées en introduisant la tension électrique selon l'équation (9), aboutissant à l'expression de la fonction de transfert :

$$H(s) = -R_e \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{b_2 s^2 + b_1 s + b_0}, \quad (10)$$

avec :

$$\begin{aligned} a_2 &= M_{ms} \\ a_1 &= \left(R_{ms} + \frac{(Bl)^2}{R_e} \right) - S \frac{\Gamma_v}{\Gamma_p} + \frac{Bl \cdot S}{\Gamma_p} \cdot \frac{R_s}{R_e} \\ a_0 &= C_{ms}^{-1} \\ b_2 &= M_{ms} \\ b_1 &= R_{ms} - \frac{S}{\Gamma_p} \cdot (Bl + \Gamma_v) \\ b_0 &= C_{ms}^{-1} \end{aligned} \quad (11)$$

3 Etude de cas

Dans ce qui suit, nous étudions les propriétés d'un absorbeur électroacoustique constitué d'un subwoofer Monacor® SPH-300 TC, dont les spécifications sont données dans la Table 1 :

Paramètre	Notation	Value	Unit
Résistance DC	R_e	6,3	Ω
Inductance	L_e	1	mH
Facteur de force	Bl	10,3	N.A ⁻¹
Masse mobile	M_{ms}	68	g
Résistance mécanique	R_{ms}	7	N.m ⁻¹ .s
Compliance mécanique	C_{ms}	0,85	mm.N ⁻¹
Surface efficace	S	495	cm ²

Table 1 : données constructeur du haut-parleur Monacor® SPH-300 TC

La face arrière du haut-parleur est enfermée dans une enceinte close de volume $V_b = 10$ litres, tandis que la face avant rayonne dans un guide d'ondes circulaires de section égale à la surface efficace du transducteur. La terminaison du guide d'onde est supposée anéchoïque dans ce qui suit.

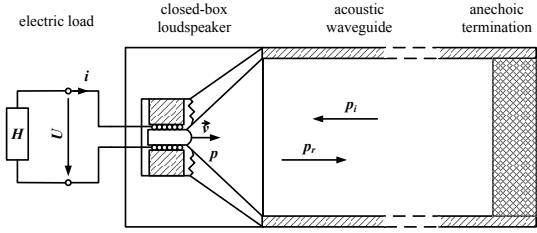


Figure 3 : description du modèle

Les simulations de l'absorbeur électroacoustique se sont appuyées sur deux modèles numériques : le premier modèle (intitulé « steady-state model ») a été obtenu en remplaçant la variable de Laplace s par la variable $j\omega$ et en calculant directement sous Matlab® les différentes fonctions de transfert décrites précédemment dans le domaine fréquentiel; le second modèle (intitulé « LTI model ») obtenu en utilisant l'outil LTI (Linear Time Invariant) de Matlab®, en introduisant une excitation $p_i(t)$ harmonique à différentes fréquences discrètes (ici les fréquences centrales des tiers-d'octave normalisés de 20 Hz à 500 Hz), permettant d'obtenir la réponse $p_r(t)$, et ainsi le coefficient d'absorption sous incidence normale à chaque fréquence.

3.1 Circuit ouvert

Dans le cas où le haut-parleur est en circuit ouvert, sa partie mobile se conduit, de manière triviale, comme un résonateur mécanique passif d'admittance normalisée :

$$Y_0(s) \approx Z_{mc} \cdot \frac{s}{s^2 M_{ms} + s R_{ms} + (C_{ms})^{-1}} \quad (12)$$

Les paramètres de l'absorbeur acoustique définis par l'équation (8) sont alors :

$$\left\{ \begin{aligned} r_{AE,0} &= \frac{R_{ms}}{SZ_c} \\ Q_{AE,0} &= \frac{1}{R_{ms}} \sqrt{\frac{M_{ms}}{C_{ms}}} \end{aligned} \right. \quad (13)$$

La fonction de transfert $H_0(s)$ dans ce cas n'a pas vraiment de sens physique, dans la mesure où elle est assimilée à une résistance infinie.

3.2 Résistance de shunt

En chargeant le haut-parleur avec une résistance électrique variable R_s , l'admittance normalisée vaut (en négligeant les termes en L_e/C_{ms}) :

$$Y_1(s) = Z_{mc} \cdot \frac{s}{s^2 M_{ms} + s \left(R_{ms} + \frac{(Bl)^2}{R_e + R_s} \right) + (C_{ms})^{-1}} \quad (14)$$

où les paramètres de l'absorbeur deviennent après simplification :

$$\begin{cases} r_{AE,1} \approx \frac{R_{ms} + (Bl)^2 / (R_e + R_s)}{SZ_c} \\ Q_{AE,1} \approx 2\pi \frac{1}{R_{ms}(R_e + R_s) + (Bl)^2} \sqrt{\frac{M_{ms}}{C_{ms}}} \end{cases} \quad (15)$$

$$(12)$$

Il est possible de trouver une valeur optimale de résistance pour laquelle la résistance (acoustique) normalisée de l'absorbeur électroacoustique à la résonance vaut 1. La résistance électrique optimale vaut alors :

$$R_{opt} = \frac{(Bl)^2}{Z_{ms} - R_{ms}} - R_e \quad (16)$$

Dans le cas du haut-parleur Monacor® SPH-300 TC, la résistance optimale vaut $R_{opt} = 1,77 \Omega$.

De manière triviale également, la fonction de transfert correspondant à ce cas de charge vaut $H_1(s) = R_s$.

3.3 Contre-réaction motionnelle - résistance négative

Nous considérons le cas pour lequel $R_s = 0 \Omega$ et $\Gamma_p = 0 \text{ V/Pa}$, ce qui signifie que seule une contre-réaction sur la vitesse vibratoire de l'équipage mobile est opérée, appelée également contre-réaction motionnelle. Les paramètres de l'absorbeur électroacoustique, définis par l'équation (6) sont, après simplifications :

$$\begin{cases} r_{AE,2} \approx \frac{1}{SZ_c} \left(R_{ms} + \frac{Bl(Bl + \Gamma_v)}{R_e} \right) \\ Q_{AE,2} \approx 2\pi \frac{1}{R_e R_{ms} + Bl(Bl + \Gamma_v)} \sqrt{\frac{M_{ms}}{C_{ms}}} \end{cases} \quad (17)$$

Par ailleurs, la charge électrique équivalente devient dans ce cas :

$$H_{AE,2} = - \left(\frac{\Gamma_v}{\Gamma_v + Bl} \right) R_e \quad (18)$$

Il est remarquable ici que la contre-réaction motionnelle est équivalente à un dispositif de résistance négative. Cette propriété a par ailleurs été montrée dans les références [4, 7], où la captation de la vitesse vibratoire de la face parlante d'un haut-parleur est obtenue à l'aide d'un pont de Wheatstone dont la tension différentielle est proportionnelle à cette grandeur, effectuant la fonction de résistance négative. Ce résultat montre qu'il est possible d'envisager des dispositifs électriques pour extraire des grandeurs acoustiques dans un transducteur électroacoustique, et en particulier dans un dispositif de contrôle actif.

3.4 Contre-réaction hybride

Le terme contre-réaction hybride désigne ici un dispositif de contrôle combinant une contre-réaction portant sur la vitesse vibratoire de l'actionneur, de gain Γ_v [V.s/m], et un contre-réaction portant sur la pression acoustique à la face parlante de l'actionneur, de gain Γ_p [V/Pa]. Dans ce qui suit, nous négligerons la résistance de source R_s de l'amplificateur alimentant l'actionneur.

Le calcul de l'admittance acoustique d'un dispositif contrôlé par contre-réaction hybride aboutit aux paramètres de l'absorbeur acoustique selon :

$$\begin{cases} r_{AE,3} \approx \frac{Bl + \Gamma_v}{Z_c \Gamma_p} \approx \frac{1}{Z_c} \cdot \frac{\Gamma_v}{\Gamma_p} \\ Q_{AE,3} \approx 2\pi \frac{1}{R_e R_{ms} + Bl(Bl + \Gamma_v)} \sqrt{\frac{M_{ms}}{C_{ms}}} \end{cases} \quad (19)$$

L'admittance normalisée obtenue avec un tel contrôle tend donc vers la valeur cible Γ_p/Γ_v autour de la résonance, et la bande passante est d'autant plus grande que la valeur du gain Γ_v est grande.

En outre, dans le cas de la contre-réaction hybride, la charge électrique équivalente devient :

$$H_{AE,3} = -R_e \left(\frac{s^2 M_{ms} + s \left(R_{ms} - S \frac{\Gamma_v}{\Gamma_p} + \frac{(Bl)^2}{R_e} \right) + \frac{1}{C_{ms}}}{s^2 M_{ms} + s \left(R_{ms} - S \frac{\Gamma_v}{\Gamma_p} - S \frac{Bl}{\Gamma_p} \right) + \frac{1}{C_{ms}}} \right) \quad (20)$$

L'équation (18) indique que, autour de la fréquence de résonance du haut-parleur, la charge électrique tend vers une valeur fixée par le rapport Γ_p/Γ_v , et tend vers une asymptote $-R_e$ aux limites du domaine. Par exemple, dans le cas où le réglage des gains vaut $\Gamma_v/\Gamma_p = Z_c$, c'est-à-dire lorsque l'absorbeur électroacoustique est réglé en absorption totale, la charge électrique à la résonance vaut :

$$H_{AE,3}(f_s) = -R_e \frac{SZ_c - R_{ms} \left(\frac{(Bl)^2}{R_e R_{ms}} + 1 \right)}{R_{ms} - SZ_c \left(\frac{Bl}{\Gamma_v} + 1 \right)} \quad (21)$$

Lorsque les gains de contre-réaction augmentent (à rapport constant), la charge électrique équivalente tend vers une résistance électrique qui vaut R_{opt} définie en 3.2.

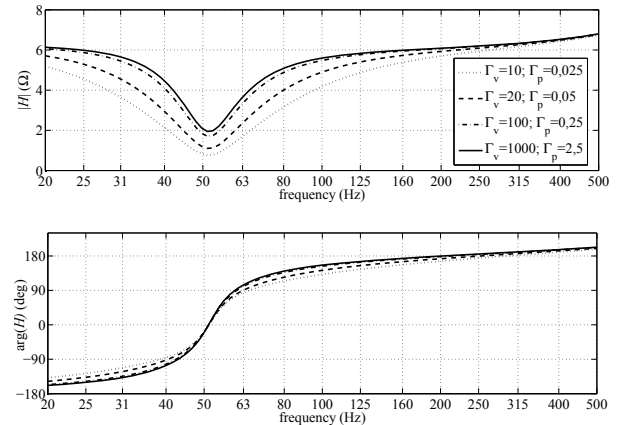


Figure 4 : fonctions de transfert équivalentes calculées avec différentes valeurs de gains de contre-réaction (leur rapport restant constant et Γ_v prenant successivement les valeurs 10, 20, 100 et 1000 V.m/s)

4 Validation expérimentale

Afin de valider les développements décrits précédemment, différents cas de contrôle sont appliqués à un haut-parleur Monacor SPH-300 TC en enceinte close (volume $V_b = 60 \text{ l}$), dont nous avons mesuré les coefficients d'absorption acoustiques selon la norme ISO 10534-2 [8]. Le dispositif expérimental est décrit sur la Figure 5 :

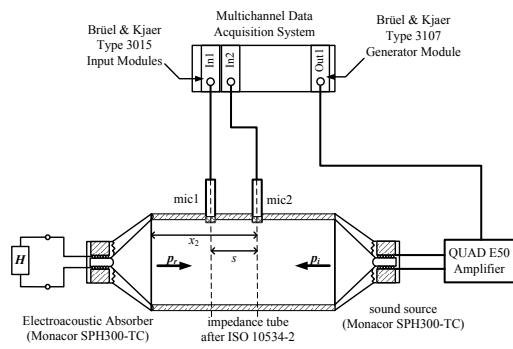


Figure 5 : dispositif expérimental pour l'évaluation du coefficient d'absorption des absorbeurs électroacoustiques

Le coefficient d'absorption défini par l'équation (3) est calculé à partir de la mesure de la pression acoustique en deux positions du tube d'impédance, à l'extrémité duquel est attaché l'absorbeur électroacoustique chargé par un dispositif de contrôle dont les paramètres peuvent être modifiés pour obtenir les différents cas décrits précédemment. La mesure de la fonction de transfert

$$H_{12} = \frac{p_1}{p_2}$$

entre les positions de microphones 1 et 2 permet de calculer un taux d'ondes stationnaires, et donc le coefficient de réflexion r selon :

$$r = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} \exp(2jkx_2) \quad (22)$$

où H_I et H_R sont des fonctions de transfert correspondant respectivement aux ondes progressives et rétrogrades dans le guide d'onde, x_2 est la distance entre le microphone 2 et l'absorbeur, et k le nombre d'ondes. Le coefficient d'absorption mesuré est alors :

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (23)$$

Les coefficients d'absorption obtenus avec les cas de contrôle suivant ont été évalués :

- (1) circuit ouvert
- (2) court-circuit
- (3) contre-réaction motionnelle ($\Gamma_v = 5 \text{ V.s/m}$)
- (4) contre-réaction hybride ($\Gamma_v = 20 \text{ V.s/m}$ et $\Gamma_p = 50 \text{ mV/Pa}$)

Dans les cas (3) et (4), la captation de la vitesse est obtenue à l'aide d'un pont de Wheatson selon [4, 7], et la captation de pression se fait à l'aide d'un microphone électret de sensibilité 10 mV/Pa placé à 5 mm dans l'axe du centre du haut-parleur. Les gains de contre-réaction et l'amplification de puissance sont opérés avec un amplificateur conçu sur mesure.

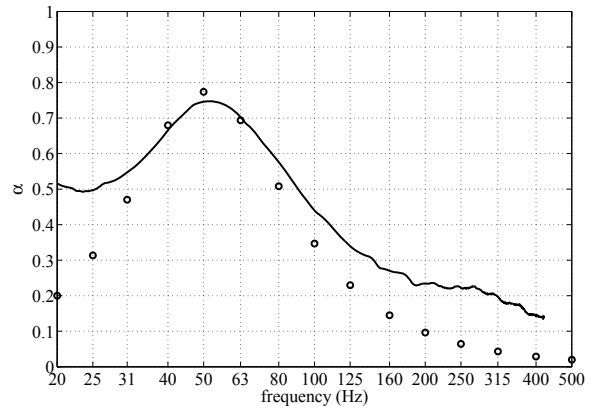


Figure 6 : validation expérimentale de l'absorbeur électroacoustique dans le cas du circuit ouvert (pointillés : simulation ; trait plein : mesures)

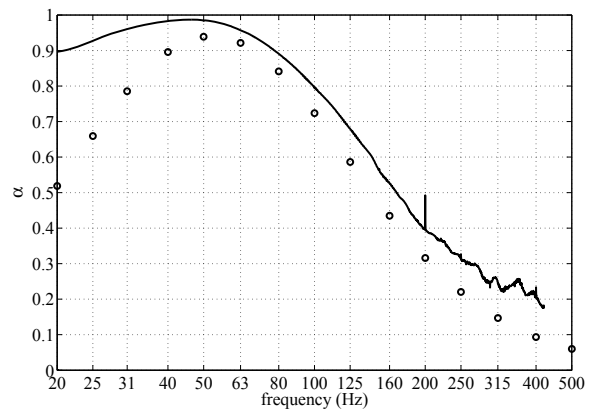


Figure 7 : validation expérimentale de l'absorbeur électroacoustique dans le cas du court-circuit (pointillés : simulation ; trait plein : mesures)

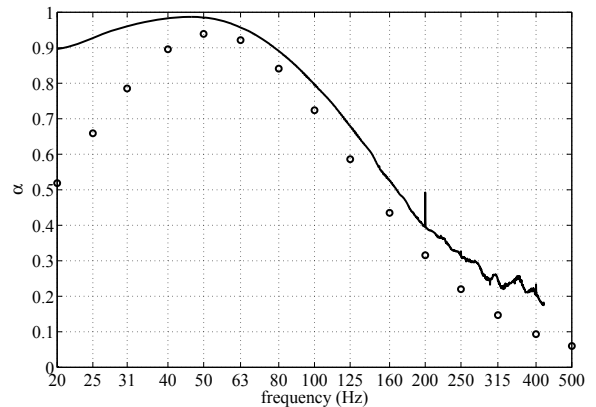


Figure 8 : validation expérimentale de l'absorbeur électroacoustique dans le cas de la contre-réaction motionnelle (pointillés : simulation ; trait plein : mesures)

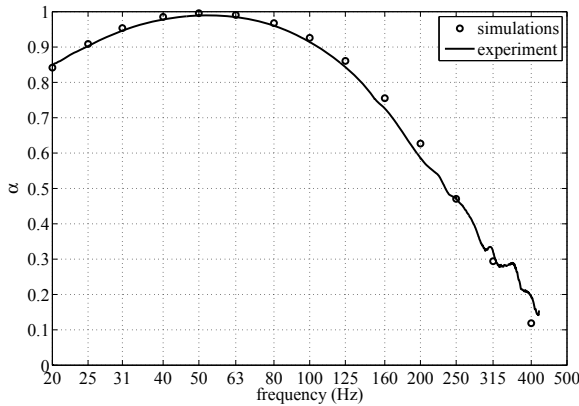


Figure 9: validation expérimentale de l'absorbeur électroacoustique dans le cas de la contre-réaction hybride (pointillés : simulation ; trait plein : mesures)

4 Conclusion

Un formalisme unifiant différentes stratégies de contrôle actif d'impédance acoustique a été présenté, sur la base d'analogies formelles présentées par l'admittance normalisée du dispositif pour les différents cas de contrôle étudiés. L'expression d'une charge électrique équivalente au contrôle actif permet de mettre en évidence la possibilité d'opérer des captations acoustiques directement par des mesures électriques aux bornes du haut-parleur.

La réalisation pratique d'un dispositif à résistance négative équivalent à la contre-réaction motionnelle a été validée dans ce travail ainsi que dans des travaux antérieurs, mais le dimensionnement de filtres électriques équivalents au cas du contrôle par contre-réaction hybride n'a pas encore été effectué. Des développements dans ce sens sont actuellement en cours.

Remerciements

L'auteur tient à remercier le Swiss National Science Foundation pour son soutien dans ce travail, dans le cadre du subside de recherche 200021-116977.

Références

- [1] Lueg P., *Process of silencing sound oscillations*, US 2043416, 1936.
- [2] Olson H. F., and May E. G., "Electronic Sound Absorber", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 25 (6), 1130-1136, (1953).
- [3] Guigou C., and Fuller C. R., "Adaptive feedforward and feedback methods for active/passive sound radiation control using smart foam", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 104 (1), 226-231, (1998).
- [4] De Boer E., "Theory of motional feedback", *Audio, IRE Transactions on*, vol. 9 (1), 15-21, (1961).
- [5] Lane S. A., and Clark R. L., "Improving loudspeaker performance for active noise control applications", *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 46 (6), 508-519, (1998).
- [6] Darlington P., *Loudspeaker circuit for use as combined source-absorber - monitors pressure at speaker and velocity of speaker diaphragm to develop related feedback signal used to modify drive to loudspeaker*, WO9703536, 1997.

- [7] Meynial X., *Active acoustic impedance control system for noise reduction*, WO9959377, 1999.
- [8] ISO:10534-2, "Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 2: Transfer-function method", International Standard Organization, 1998.