

CFA/VISHNO 2016

Etude expérimentale de la réduction du bruit par membrane non linéaire encoffrée

P.-Y. Bryk, S. Bellizzi et R. Côte

LMA-CNRS, 4 impasse Nikola Tesla, CS 40006, 13453 Marseille Cedex 13, France
bryk@lma.cnrs-mrs.fr



LE MANS

Cette article présente l'étude expérimentale d'un tube résonant couplé à différents absorbeurs non linéaires. Dans une première partie le système primaire et les différents absorbeurs sont présentés. Les absorbeurs basés sur le principe d'une membrane non linéaire couplée au milieu primaire sont de trois types et se distinguent par la présence ou non d'un encoffrement. Celui-ci peut être passif ou actif avec la présence d'une boucle d'asservissement de la pression acoustique. Dans une seconde partie les outils et méthodes d'analyse pour les régimes linéaires et non linéaires sont exposés. Les résultats obtenus avec les absorbeurs dits "passifs" en régime linéaire et non linéaire sont ensuite présentés. Ces résultats mettent en évidence l'effet de l'encoffrement d'une membrane non linéaire sur le phénomène de pompage acoustique. Dans une dernière partie les résultats obtenus en régime linéaire sur un absorbeur actif sont détaillés.

1 Introduction

La réduction du bruit en basses-fréquences demeure à l'heure actuelle un problème persistant dans de nombreux domaines de l'acoustique. Afin de répondre à cette problématique, le LMA développe des absorbeurs de bruit non linéaires. Ce type d'absorbeur repose sur le principe du "Target Energy Transfer (TET)" ou "pompage énergétique" mis en évidence au début des années 2000 dans le domaine de la Mécanique [1]. Le pompage énergétique se produit lorsqu'un système essentiellement non linéaire (l'absorbeur) est couplé au système primaire. Sous certaines conditions, un transfert irréversible d'énergie s'établit du milieu primaire vers l'absorbeur où l'énergie se trouve "piégée" et dissipée. Ce phénomène résulte d'une dynamique complexe introduite par la non-linéarité et peut être décrit en terme de capture de résonance et de modes non linéaires localisés [2]. Ce phénomène apparaît sous différents types d'excitation [3]. Sous ce principe de fonctionnement l'absorbeur non linéaire est classiquement appelé Nonlinear Energy Sink (NES).

Dans le contexte de la réduction du bruit, le TET est une bonne opportunité pour développer un système passif de réduction du bruit basse fréquence. La première expérience mettant en évidence le TET en acoustique est décrite dans [4]. Le NES était constitué d'une membrane mince circulaire visco-élastique encastrée. Une étude complète de ce type de NES est présentée dans [5]. Des travaux ont montré aussi qu'un haut-parleur sans moteur travaillant hors de son domaine linéaire pouvait être utilisé comme NES [6]. L'avantage de la technologie haut-parleur sur la technologie membrane réside dans la possibilité d'ajuster indépendamment les paramètres mécaniques de l'absorbeur.

Toutefois l'utilisation d'un NES de type membrane peut ne pas être possible dans toutes les configurations. En effet, outre l'énergie acoustique "pompe" et dissipée par le NES, une partie l'énergie acoustique est aussi rayonnée à plus haute fréquence ce qui revient donc à décaler la nuisance sonore indésirable en fréquence. Une solution qui consiste à encoffrer la face arrière de la membrane a déjà fait l'objet d'une étude numérique [7].

L'objectif de ce travail est d'étudier expérimentalement comment cette nuisance peut être surmontée par l'utilisation conjuguée de l'encoffrement d'une des faces du NES et d'une boucle d'asservissement de la pression acoustique dans l'encoffrement.

2 Présentation du système étudié

2.1 Système primaire

Le système primaire est composé d'un tube résonant en forme de U de longueur $L = 2.25$ m, de section

$S = 7 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ et de première fréquence de résonance $f = 85$ Hz. Une de ses extrémités est reliée par une boîte de couplage (volume $V_1 = 0.0436 \text{ m}^3$) à un haut-parleur source (Audax HT240GO) tandis que l'autre extrémité est reliée via une deuxième boîte de couplage (volume $V_2 = 0.0395 \text{ m}^3$) à différents types de NES. La figure 1 présente le système primaire couplé à un NES de type 2 tandis que la figure 3 présente le schéma équivalent.

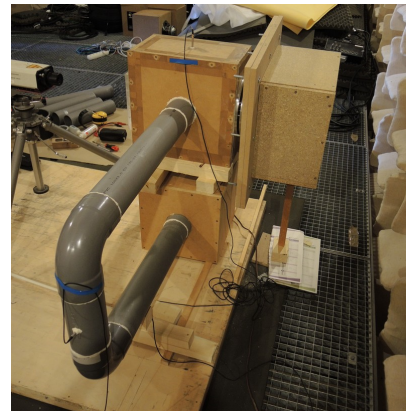


FIGURE 1 – Système primaire couplé à un NES 2 (voir 2.2)

2.2 NES étudiés

Trois NES sont proposés à l'étude (figure 2) :

- NES 1 : une membrane visco-élastique en latex non linéaire dont l'une des faces est couplée au milieu primaire via la boîte de couplage V_2 tandis que l'autre face rayonne vers l'extérieur. Un support en aluminium permet de maintenir cette membrane et de régler sa pré-tension (qui modifie la fréquence de résonance linéaire de la membrane à bas niveau).
- NES 2 : NES 1 dont la face arrière est encoffrée à l'aide d'un volume $V_e = 0.0397 \text{ m}^3$ afin d'empêcher son rayonnement vers l'extérieur.
- NES 3 : NES 1 dont la face rayonnant vers l'extérieur est encoffrée à l'aide d'un volume $V_e = 0.02 \text{ m}^3$ qui comprend également une boucle d'asservissement de la pression acoustique. Cette boucle dont l'objectif est de réduire la pression dans le volume V_e est constituée d'un microphone de mesure, d'une boucle de feedback et d'un haut-parleur de contrôle encoffré (volume $V_{HP} = 0.0256 \text{ m}^3$).

En basses-fréquences, la pression acoustique générée par le déplacement de la membrane dans l'encoffrement peut être considérée en première approximation comme homogène et proportionnelle à la variation de volume ΔV_e . Dans le cas du

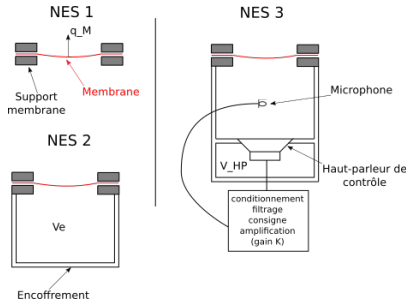


FIGURE 2 – Schéma des trois NES étudiés

NES 2 la pression P_e peut s'écrire :

$$P_e = -\rho c^2 \frac{\Delta V_e}{V_e} = -\frac{\rho c^2 S_M}{V_e} \frac{1}{2} q_M \quad (1)$$

Avec ρ la masse volumique de l'air, c la célérité du son, S_M la surface de la membrane et q_M le déplacement de la membrane.

La pression P_e qui exerce une force opposée au déplacement de la membrane via sa surface S_M est donc vue par celle-ci comme un terme de raideur qui augmente la fréquence de résonance du NES (membrane+volume V_e).

Les volumes des encoffrements pour les NES 2 et 3 ont donc été choisis assez petits pour que le décalage vers le haut de la fréquence de résonance du NES soit conséquent sans pour autant dépasser la fréquence propre du système primaire. En effet une condition nécessaire pour que la capture de résonance, à l'origine du pompage, ait lieu à fort niveau est que la fréquence de résonance à bas niveau du NES soit inférieure à celle du système primaire.

3 Outils et méthodes d'analyse du système

3.1 En régime linéaire

Afin de caractériser le système en régime linéaire les fonctions de transferts entre les signaux de pression dans le montage et le haut-parleur source sont mesurées à bas niveau. Lorsque le NES 3 est couplé au système primaire les fonctions de transfert par rapport au haut-parleur de contrôle sont également mesurées. Le signal d'excitation est un bruit blanc compris entre 10 Hz et 2 kHz avec un pas de 0,625 Hz tandis que les signaux sont acquis avec une fréquence d'échantillonnage de 8,192 kHz.

La figure 3 montre le branchement des microphones et des sources d'excitation sur le système étudié. Les grandeurs mesurées sont la pression acoustique au milieu du tube (P_{tube}), dans la boîte de couplage ($P_{couplage}$) et dans l'encoffrement ($P_{contrôle}$) lorsque le NES 3 est utilisé. U_{source} désigne la tension d'excitation en entrée de l'amplificateur du haut-parleur source et qui permet de mesurer les fonctions de transfert $\frac{P_{tube}}{U_{source}}$, $\frac{P_{couplage}}{U_{source}}$ et $\frac{P_{contrôle}}{U_{source}}$. Dans le cas où le NES 3 est utilisé la boucle d'asservissement est soit ouverte (le microphone de contrôle n'est pas relié au haut-parleur de contrôle et permet de mesurer $P_{contrôle}$) soit fermée (la boucle d'asservissement est donc active et annule la pression dans le volume d'encoffrement). Dans le cas où la boucle est ouverte, on peut mesurer les fonctions de transfert $\frac{P_{tube}}{U_{contrôle}}$, $\frac{P_{couplage}}{U_{contrôle}}$ et $\frac{P_{contrôle}}{U_{contrôle}}$ où $U_{contrôle}$ désigne la tension d'excitation

imposée en entrée de l'amplificateur du haut-parleur de contrôle par l'analyseur Oros.

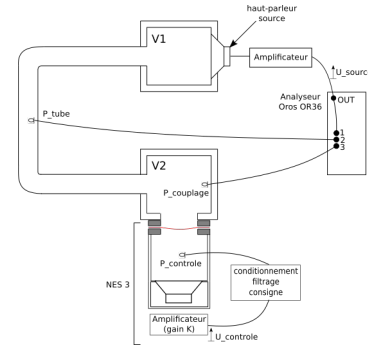


FIGURE 3 – Schéma de la mesure des fonctions de transfert dans le cas où le système primaire est couplé au NES 3 avec la boucle fermée

3.2 En régime non linéaire

L'étude en régime non linéaire du système a pour but de mettre en évidence le phénomène de pompage à l'aide de mesures temporelles lorsque la source est sollicitée par un signal sinusoïdal. Le schéma du montage expérimental est présenté dans la figure 4 :

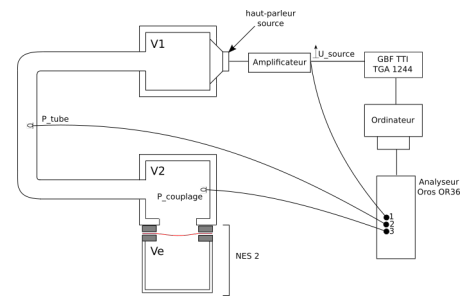


FIGURE 4 – Schéma des mesures temporelles dans le cas où le système primaire est couplé au NES 2

La source commandée en courant est excitée à forte amplitude par un signal sinusoïdal à l'aide d'un générateur de fonction TTI TGA1244. On fait varier à la fois l'amplitude et la fréquence du signal sinusoïdal. L'amplitude d'excitation varie entre $0,03 A_{rms}$ et $0,83 A_{rms}$ par pas de $0,015 A_{rms}$ tandis que la fréquence d'excitation varie entre 80 Hz et 92 Hz par pas de 0,5 Hz. Pour chaque couple fréquence-amplitude d'excitation les signaux de pression des différents microphones sont mesurés durant 20 secondes par l'analyseur Oros (fréquence d'échantillonnage $f_e = 4,095$ kHz). La valeur efficace lors du régime établi est extraite pour chacune de ces mesures, ce qui permet de tracer le signal de pression mesuré en fonction de la fréquence et de l'amplitude d'excitation. Ce graphique 3D est réduit à une courbe 2D qualifiée de "ligne de crête" en traçant le maximum de la pression en fonction de l'intensité de la source. Ce mode de représentation permet de mettre en évidence clairement les plateaux de pompage.

En effet lors du pompage le niveau de pression maximum reste constant dans le tube alors qu'on augmente le niveau de la source, ce qui se traduit par un écrêtement de la pression sur la ligne de crête. Ce "plateau" de pompage peut être caractérisé par son seuil de déclenchement ainsi que son étendue.

4 Etude des NES passifs

Cette section est consacrée à l'étude des NES 1 et 2 en régime linéaire et non linéaire.

4.1 NES 1 et 2 avec la même pré-tension mécanique

Dans un premier temps, le NES 1 et le NES 2 constitués de la même membrane et avec le même réglage de pré-tension sont étudiés. L'objectif est donc de déterminer l'effet de l'encoffrement sur le fonctionnement de la membrane. La figure 5 présente la fonction de transfert $\frac{P_{tube}}{U_{source}}$ mesurée pour chacun des NES.

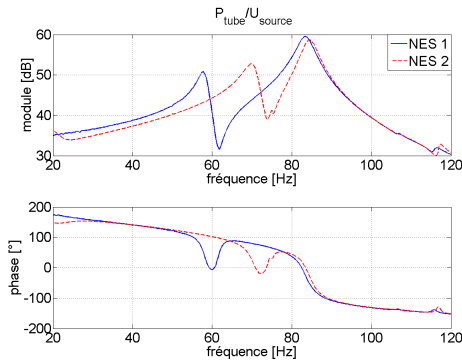


FIGURE 5 – Fonctions de transfert mesurées dans le tube avec les NES 1 et 2

Chaque fonction de transfert présente deux pics de résonance, dont l'un est situé à 85 Hz dans les deux cas et qui peut être attribué à la résonance du tube. Dans le cas du NES 1, on observe une première fréquence de résonance à 57,75 Hz tandis que dans le cas du NES 2 cette résonance se situe à 69,75 Hz. L'augmentation de cette fréquence pour le NES 2 confirme l'effet de raideur ajoutée apporté par l'encoffrement sur la membrane qui translate sa fréquence de résonance. Cette translation de fréquence se retrouve avec le même ordre de grandeur dans les simulations obtenues avec le modèle présenté dans [7].

Dans un second temps le système primaire couplé avec chaque NES est étudié à fort niveau. Les résultats sont présentés dans les figures 6, 7, 8 et 9 :

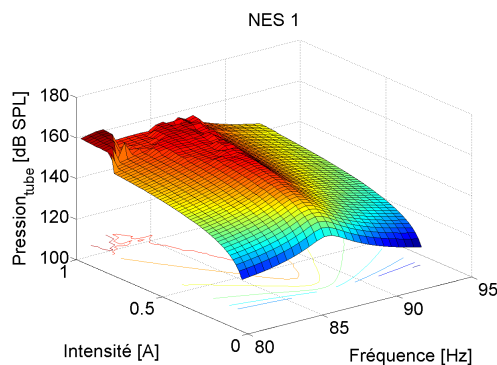


FIGURE 6 – Pression mesurée dans le tube en fonction de la fréquence et de l'intensité avec le NES 1

La figure 9 présente les signaux temporels de la pression mesurée dans le tube pour chaque régime de fonctionnement du NES. On peut observer qu'en dehors du plateau de

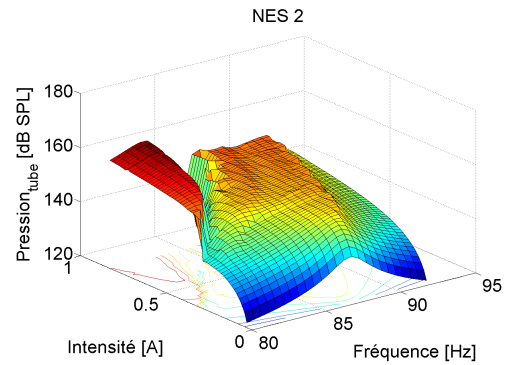


FIGURE 7 – Pression mesurée dans le tube en fonction de la fréquence et de l'intensité avec le NES 2

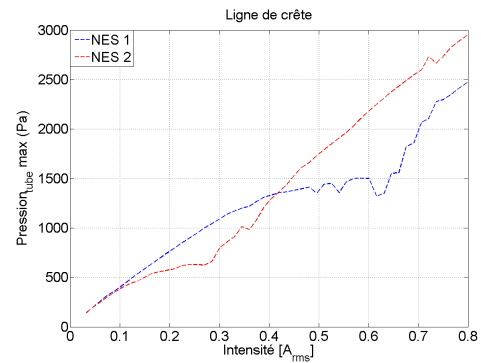


FIGURE 8 – Lignes de crête pour les NES 1 et 2

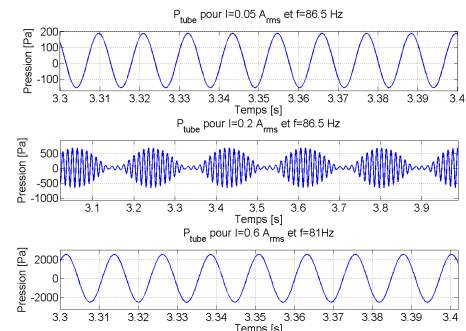


FIGURE 9 – Régimes temporels mesurés pour les différents régimes du NES 2

pompage (c'est à dire à faible niveau ($I = 0,05 A_{rms}$ pour $f = 86,5$ Hz) et à très fort niveau ($I = 0,6 A_{rms}$ pour $f = 81$ Hz)), la pression dans le tube est un signal sinusoïdal à la fréquence d'excitation imposée par le haut-parleur source. En revanche dans le régime de pompage ($I = 0,2 A_{rms}$) le signal sinusoïdal est fortement modulée, ce qui traduit le transfert d'énergie acoustique vers le NES à chaque fois que le niveau de pression atteint le seuil de déclenchement du pompage.

Les figures 6, 7 et 8 illustrent l'effet de l'encoffrement sur le phénomène de pompage : celui-ci se déclenche plus tôt mais persiste sur une plage d'excitation plus limitée. En effet il se produit entre $I = 0,42 A_{rms}$ et $I = 0,65 A_{rms}$ dans le cas non encoffré (NES 1) alors que dans le cas encoffré (NES 2) c'est entre $I = 0,16 A_{rms}$ et $I = 0,27 A_{rms}$. En ce qui concerne le seuil de déclenchement celui-ci est égal à 560 Pa dans le cas encoffré et à 1300 Pa dans le cas non encoffré. Ces variations sont en accord avec l'étude paramétrique

réalisée dans [5] suivant le paramètre de raideur linéaire de la membrane.

Il a été observé expérimentalement que lorsque ce volume devient trop petit le phénomène de pompage disparaît alors totalement. Ce phénomène est dû au terme de raideur linéaire rajouté à bas niveau par l'encoffrement. Lorsque ce terme est trop grand, la fréquence de résonance à bas niveau du NES devient supérieure à celle du milieu primaire et il n'y a pas de captures de résonance lorsque le niveau augmente, ce qui empêche le phénomène de pompage acoustique.

4.2 NES 1 et 2 avec la même fréquence de résonance apparente à bas niveau

Dans cette partie on compare les résultats obtenus pour le NES 1 et le NES 2 avec chacun un réglage de tension de la membrane différent. Ces réglages ont été effectués de manière à obtenir la même première fréquence de résonance correspondant à la membrane pour le NES 1 et à la membrane + V_e pour le NES 2. La figure 10 monte les fonctions de transfert mesurées sur ces deux configurations. On observe bien que les deux premiers pics se produisent à la même fréquence. Cependant le pic associé au NES 2 est moins résonant et plus étalé ce qui pourrait signifier que l'encoffrement ajoute de la dissipation.

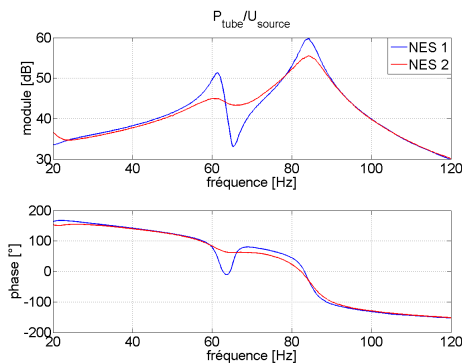


FIGURE 10 – Mesure de $\frac{P_{tube}}{U_{source}}$ pour les NES 1 et 2

La figure 11 présente la ligne de crête mesurée sous sollicitation sinusoïdale en régime non linéaire avec chaque NES et la figure 12 les signaux temporels de la pression mesurée dans le tube correspondant aux trois régimes de fonctionnement des NES (faible niveau pour $I = 0.1 A_{rms}$ avec $f = 85$ Hz, pompage pour $I = 0.57 A_{rms}$ avec $f = 85$ Hz et très fort niveau pour $I = 0.67 A_{rms}$ avec $f = 80$ Hz). On peut constater sur la figure 11 que les plateaux de pompage sont similaires, avec le même seuil de déclenchement et la même étendue. De plus les deux NES présentent les mêmes types de réponses temporelles avec des amplitudes du même ordre de grandeur pour une fréquence et une amplitude d'excitation identiques (figure 12). Cela signifie donc que le raidissement de la membrane provoqué par le volume d'encoffrement chez le NES 2 est équivalent au raidissement purement mécanique de la membrane chez le NES 1. Le réglage mécanique de la membrane étant peu aisé et difficilement reproductible l'ajout d'un volume d'encoffrement peut donc constituer un moyen plus commode de régler la fréquence linéaire de la membrane.

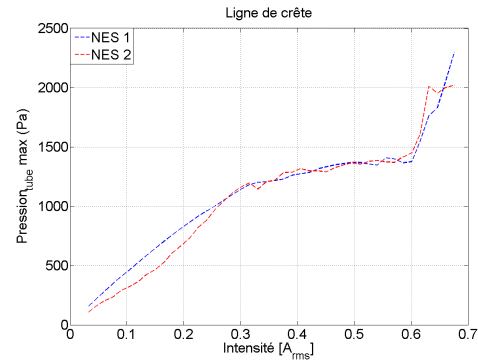


FIGURE 11 – Lignes de crête mesurées pour les NES 1 et 2

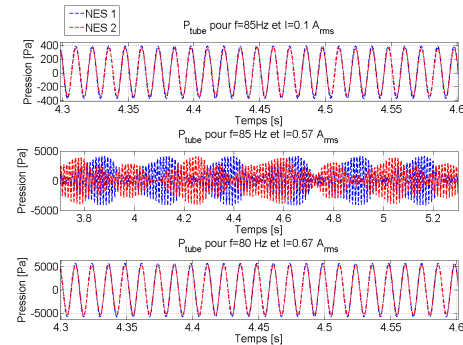


FIGURE 12 – Signaux temporels de pression mesurés pour les NES 1 et 2

5 Etude du NES actif

Le NES 3 possède un encoffrement actif, c'est à dire un encoffrement incluant une boucle d'asservissement de la pression. Le but de cette boucle est d'annuler la variation du volume d'encoffrement due au déplacement de la membrane.

En effet à basses-fréquences la pression acoustique est équivalente à un terme de raideur inverserment proportionnel au volume V_e . Or c'est ce terme de raideur introduit par l'encoffrement qui perturbe le fonctionnement du pompage acoustique et que l'on souhaite donc faire disparaître.

L'objectif de cette étude est de valider expérimentalement le principe d'un NES avec encoffrement actif qui annule le terme de raideur propre au volume V_e . Cela signifie que la fréquence de résonance du NES 3 doit être identique à celle du NES 1 pour un même réglage de pré-tension. Pour ce faire on propose de comparer les fonctions de transfert $\frac{P_{couplage}}{U_{source}}$, où la résonance due à la membrane est clairement visible, lorsque la boucle est éteinte puis active.

5.1 Boucle d'asservissement

La boucle d'asservissement de type feedback (cf figure 13) est composée d'un microphone de mesure G.R.A.S 40PR, d'un filtre passe-bas Kemo Benchmaster VBF8, d'un amplificateur Tira BAA 120 commandé en tension et d'un haut-parleur encoffré Beyma SM-108. Ce haut-parleur a été choisi car il peut générer un débit équivalent à celui du NES à fort niveau tout en restant linéaire (il peut générer un débit de $0,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pour une fréquence d'excitation de 80 Hz).

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) peut être définie à partir du schéma-bloc de la figure 13 comme :

$$FTBO = H_3(w)H_2(w)H_1(w) \quad (2)$$

la FTBO expérimentale correspond à la mesure du transfert $\frac{P_{\text{control}}}{U_{\text{control}}}$.

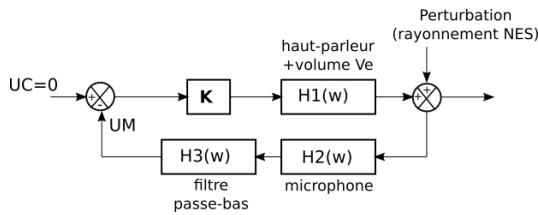


FIGURE 13 – Boucle d'asservissement

5.2 Etude de stabilité et gain maximal

La stabilité de la boucle peut être prédite à partir de la mesure de la FTBO reportée dans les figures 14 et 15 :

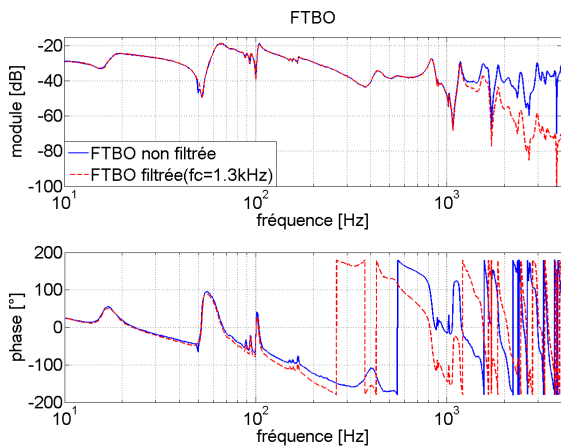


FIGURE 14 – Diagramme de Bode de la FTBO

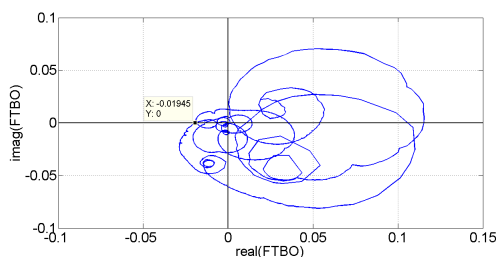


FIGURE 15 – Diagramme de Nyquist de la FTBO filtrée

Le filtre passe-bas présent dans la boucle a pour but d'atténuer les résonances acoustiques de l'encoffrement qui sont à l'origine des instabilités. Le filtre choisi est un Butterworth d'ordre 4 dont la fréquence de coupure doit être placée avant la première fréquence d'instabilité ($f = 1,5 \text{ kHz}$). L'effet de ce filtre est visible sur la figure 14 où sont superposées les FTBO filtrée et non filtrée. La rotation de phase introduite par ce filtre génère une nouvelle instabilité en basse-fréquence mais avec une marge de gain plus grande. La fréquence de coupure $f_c = 1,3 \text{ kHz}$ a été choisie afin de maximiser la marge de gain de la nouvelle fréquence d'instabilité.

D'après la figure 15 la marge de phase est de 360 degrés tandis que la marge de gain est égale à 34 dB. On fixe comme valeur maximale du gain $K = 28 \text{ dB}$, ce qui laisse 6 dB de marge de gain afin de garantir la stabilité de la boucle d'asservissement.

L'atténuation théorique obtenue pour cette valeur de gain est présentée dans la figure 16. L'atténuation est définie comme le rapport entre la pression dans l'encoffrement lorsque la boucle est éteinte et la même pression lorsque la boucle est en marche. Elle peut s'écrire comme $Att = |1 + K \times FTBO|$.

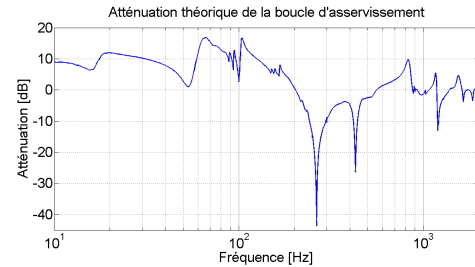


FIGURE 16 – Atténuation théorique de la boucle d'asservissement

L'atténuation moyenne entre 10 Hz et 200 Hz est égale à 8,5 dB, soit un volume V_e "apparent" multiplié par un facteur 2,6. On peut noter qu'à plus hautes fréquences l'atténuation se dégrade mais on souhaite uniquement agir sur les basses-fréquences où la pression agit comme un terme de raideur.

5.3 Mesure des fonctions de transfert avec encoffrement actif

La figure 17 présente la fonction de transfert $\frac{P_{\text{couplage}}}{U_{\text{source}}}$ mesurée pour différentes valeurs du gain K de la boucle d'asservissement. La figure 18 présente la même fonction de transfert mesurée pour un NES 1 et un NES 3 possédant le même réglage de pré-tension pour la membrane. Le gain K est exprimé en valeur linéaire dans les figures 17 et 18.

La simulation de $\frac{P_{\text{couplage}}}{U_{\text{source}}}$ obtenue pour $K=10$ à partir des mesures des fonctions de transferts lorsque la boucle est éteinte est également superposée avec la courbe expérimentale correspondante dans la figure 17.

D'après la figure 18 le contrôle actif du NES 3 permet bien d'annuler le terme de raideur de l'encoffrement puisqu'on retrouve la fréquence de résonance d'origine de la membrane avant encoffrement. En revanche l'encoffrement provoque un élargissement du pic de résonance du NES. Cependant cela ne devrait pas jouer sur les performances du pompage si on se fie aux résultats de la section 4.2.

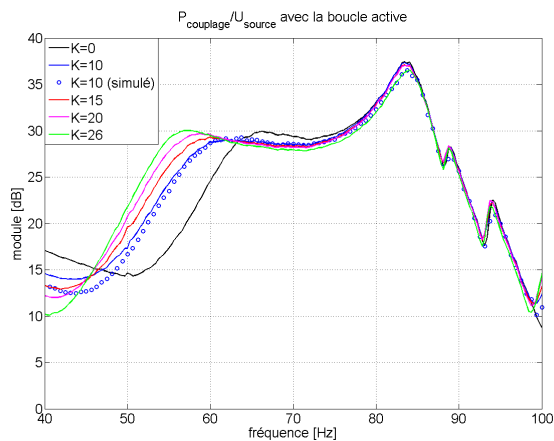


FIGURE 17 – Fonction de transfert $\frac{P_{\text{couplage}}}{U_{\text{source}}}$ mesurée avec le NES 3 en fonction du gain K

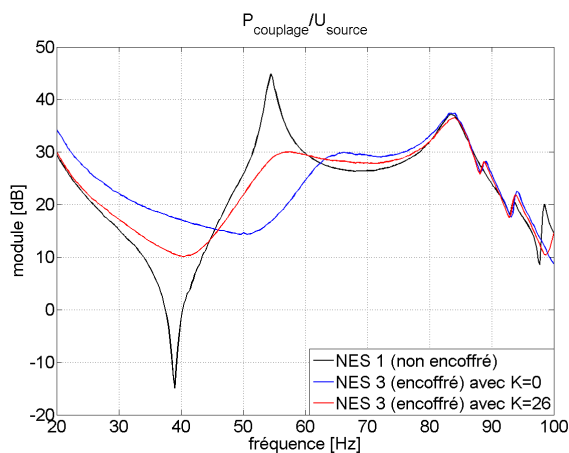


FIGURE 18 – Comparaison de $\frac{P_{\text{couplage}}}{U_{\text{source}}}$ entre le NES 1 et le NES 3 (avec $K=0$ et $K=26$)

6 Conclusion

Cette étude a permis de mettre en évidence l'effet d'un encoffrement sur le fonctionnement d'un NES de type membrane visco-élastique non linéaire. En effet les mesures de fonctions de transfert à bas niveau ont montré que l'ajout d'un encoffrement décale vers le haut la fréquence de résonance du NES. Ce décalage étant inversement proportionnel au volume V_e , lorsque celui-ci est trop petit le phénomène de pompage disparaît puisqu'il n'y a plus de capture de résonance possible entre le NES et le système primaire.

Le principe et la validation expérimentale à bas niveau d'un NES avec encoffrement actif ont été présentés afin de contourner ce problème. En effet la boucle d'asservissement présente dans l'encoffrement de ce NES permet d'annuler le terme de raideur introduit par l'encoffrement, ce qui devrait permettre d'obtenir les mêmes performances qu'un NES non encoffré en terme de pompage tout en conservant un encombrement minimum de l'encoffrement.

La suite des travaux consistera donc à étudier le NES 3 à fort niveau afin de vérifier que l'on obtient des plateaux de pompage similaires à ceux d'un NES 1 avec le même réglage de pré-tension de la membrane.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la DGA pour le financement de ces travaux de recherche.

Références

- [1] A. Vakakis, O. Gendelman, L. Bergman, D. McFarland, G. Kerschen, and Y. Lee, *Nonlinear targeted energy transfer in mechanical and structural systems*, vol. 156 of *Solid mechanics and its applications*. Springer, 2008.
- [2] E. Gourdon and C.-H. Lamarque, "Energy pumping for a larger span of energy," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 285, pp. 711–720, 2005.
- [3] E. Gourdon, N. Alexander, C. Taylor, C.-H. Lamarque, and S. Pernot, "Nonlinear energy pumping under transient forcing with strongly nonlinear coupling : Theoretical and experimental results," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 300, pp. 522–551, 2007.
- [4] B. Cochelin, P. Herzog, and P.-O. Mattei, "Experimental evidence of energy pumping in acoustics," *C. R. Mécanique*, vol. 334, no. 11, pp. 639–644, 2006.
- [5] R. Bellet, *Vers une Nouvelle Technique de Contrôle Passif du Bruit : Absorbant Dynamique Non Linéaire et Pompage Énergétique*. PhD thesis, Université de Provence, 2010.
- [6] R. Mariani, S. Bellizzi, B. Cochelin, P. Herzog, and P.-O. Mattei, "Toward an adjustable nonlinear low frequency acoustic absorber," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 330, pp. 5245–5258, 2011.
- [7] P.-Y. Bryk, S. Bellizzi, and R. Cote, "Influence d'un encoffrement sur un absorbant acoustique non linéaire pour les basses-féquences," in *CFM2015, 22^{ème} Congrès Français de Mécanique, 24 au 28 Aout 2015*, 2015.