

Etude expérimentale d'un système acoustique à 2 degrés de liberté couplé à un NES

Renaud Côte² Marc Pachebat¹ Sergio Bellizzi¹

¹Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, CNRS,
Marseille , France

²Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Aix-Marseille Univ,
Marseille, France

GDR DYNOLIN, 17 octobre 2013, Lille

Problématique

- Constat : 1 Absorbeur non linéaire (NES) réduit efficacement les vibrations d'1 d.d.l.
- Questionnement initial : 1 NES peut-il affecter plusieurs d.d.l. simultanément ?
- Difficulté : Principe de superposition non valable - couplages

Réponse théorique et numérique : Oui mais...

- Starosvetsky *et al.* Nonlinear Dynam (2011) :
2 fréquences proches ($\Delta f/f=1\%$)
- Pham *et al.* J Vib Control (2012) :
validation théorique, HBM à $f_1, f_2, (2f_1 - f_2, 2f_2 - f_1)$
- Bellizzi *et al.* J Sound Vib (2013) :
étude en acoustique (HBM à 1 terme, stabilité, SMR)

Objectif expérimental :

- Efficacité et fonctionnement d'un NES acoustique couplé à un système linéaire à 2 d.d.l. sous excitation à 2 fréquences. (soumis à J Sound Vib)

Problématique

- Constat : 1 Absorbeur non linéaire (NES) réduit efficacement les vibrations d'1 d.d.l.
- Questionnement initial : 1 NES peut-il affecter plusieurs d.d.l. simultanément ?
- Difficulté : Principe de superposition non valable - couplages

Réponse théorique et numérique : Oui mais...

- Starosvetsky *et al.* Nonlinear Dynam (2011) :
2 fréquences proches ($\Delta f/f=1\%$)
- Pham *et al.* J Vib Control (2012) :
validation théorique, HBM à $f_1, f_2, (2f_1 - f_2, 2f_2 - f_1)$
- Bellizzi *et al.* J Sound Vib (2013) :
étude en acoustique (HBM à 1 terme, stabilité, SMR)

Objectif expérimental :

- Efficacité et fonctionnement d'un NES acoustique couplé à un système linéaire à 2 d.d.l. sous excitation à 2 fréquences. (soumis à J Sound Vib)

Problématique

- Constat : 1 Absorbeur non linéaire (NES) réduit efficacement les vibrations d'1 d.d.l.
- Questionnement initial : 1 NES peut-il affecter plusieurs d.d.l. simultanément ?
- Difficulté : Principe de superposition non valable - couplages

Réponse théorique et numérique : Oui mais...

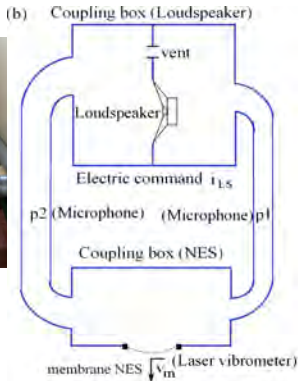
- Starosvetsky *et al.* Nonlinear Dynam (2011) :
2 fréquences proches ($\Delta f/f=1\%$)
- Pham *et al.* J Vib Control (2012) :
validation théorique, HBM à $f_1, f_2, (2f_1 - f_2, 2f_2 - f_1)$
- Bellizzi *et al.* J Sound Vib (2013) :
étude en acoustique (HBM à 1 terme, stabilité, SMR)

Objectif expérimental :

- Efficacité et fonctionnement d'un NES acoustique couplé à un système linéaire à 2 d.d.l. sous excitation à 2 fréquences. (soumis à J Sound Vib)

- L'expérience et son modèle
- Efficacité pour la réduction du son
- Interaction des composantes source
- Conclusion

Montage expérimental



Source sonore

- Signal de commande
↪ Amplificateur (i_{HP})
↪ Haut-Parleur
- Event (bass reflex)

2 résonateurs acoustiques

- tube 1 (p_1)
- tube 2 (p_2)

NES et boîte de couplage

- NES membrane
- vitesse centrale v_m

Modèle

(Bellet *et al.*, 2007), (Mariani *et al.*, 2010), (Bellizzi *et al.*, 2011)

- Tube 1 : 1 d.d.l. type masse-ressort
(réduction de Rayleigh-Ritz) - idem pour Tube 2 :

$$m_1 \ddot{u}_1 + 2\tau_1 \sqrt{k_1 m_1} \dot{u}_1 + k_1 u_1 + S_1 \Delta p_m + S_1 \Delta p_{s1} = 0$$

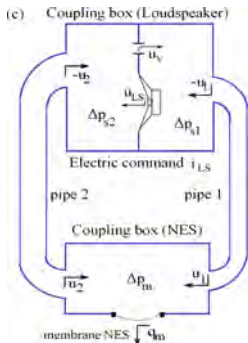
- Membrane : 1 d.d.l. type masse-ressort
à raideur linéaire + raideur cubique :

$$m_m \ddot{q}_m + \left(+2k_3 |q_m|^2 \right) \eta \dot{q}_m + k_m \frac{f^2}{f_0^2} q_m - \frac{1}{2} S_m \Delta p_m + k_3 q_m^3 = 0$$

- avec couplage piston :

$$\Delta p_m = k_{b_m} (S_1 u_1 + S_2 u_2 - \frac{1}{2} S_m q_m)$$

- + 2 autres d.d.l. u_{LS} et u_v (HP et évent)



Analyse modale de la partie linéaire du modèle

Modèle complet à 5 d.d.l. :

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{U}(t) + \mathbf{F}(\mathbf{U}(t)) + \mathbf{G}(\mathbf{U}(t), \dot{\mathbf{U}}(t)) = \mathbf{E}i_{LS}(t)$$

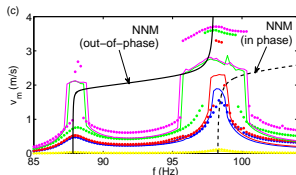
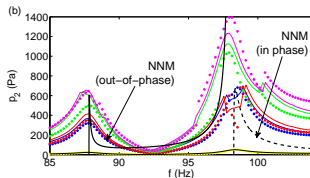
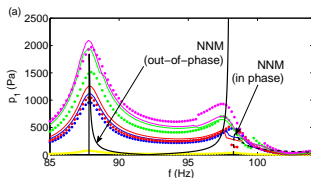
Modes normaux : \mathbf{K} , \mathbf{M}

Mode n°	1	2	3	4	5
ω_i (Hz)	29.57	34.45	87.83	98.32	113.52
u_1	-0.0093	0.0064	1.0000	-0.5182	0.0738
u_2	-0.0084	-0.0051	-0.2993	-0.8485	-0.1463
q_m	-1.0000	0.0211	-0.2130	0.6036	0.0379
u_v	-0.0063	-1.0000	-0.8965	-1.0000	1.0000
u_{LS}	0.002	0.0570	-0.0837	-0.0851	0.0783

opposition de phase
mode en phase

Comparison Modèle-Expérience

Excitation Sinusoidale : $e(t) = E \cos(2\pi ft)$



Expériences : pointillés
Modèle : lignes continues

Niveaux source :

bas (jaune : $E = 0.0043$)

moyen (bleu : $E = 0.057$ et rouge : $E = 0.061$)

haut (vert : $E = 0.087$ et magenta : $E = 0.096$)

Conduite des expériences

Réalisation de 9 tests avec une excitation mono ou bi-périodique :

$$e(t) = A \cos(2\pi f^A t) + B \cos(2\pi f^B t)$$

Tests 1 à 5:

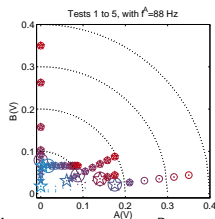
$f^A = 88$ Hz, et $f^B \in [94, 104]$ Hz, balayé autour de la résonance du mode en phase (≈ 98.8 Hz)

Tests 6 to 9:

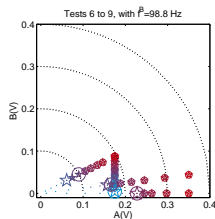
$f^A \in [85, 95]$ Hz balayé autour du mode en opposition de phase (≈ 88 Hz), et $f^B = 98.8$ Hz.

Chaque test est un ensemble de balayages en fréquence réalisés à plusieurs amplitudes source A et B .

$f^A = 88$ Hz and $f^B \in [95, 104]$ Hz



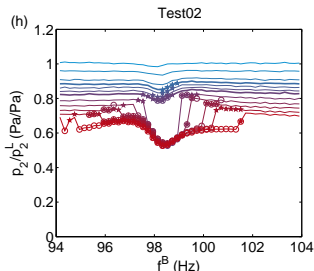
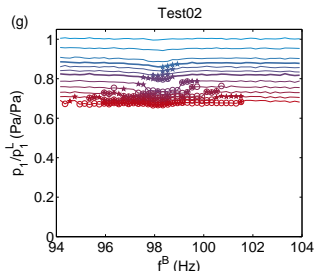
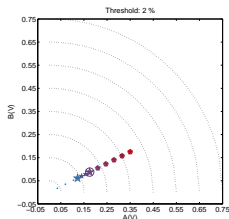
$f^A \in [85, 95]$ Hz and $f^B = 98.8$ Hz



Efficacité RMS

Test 2: $e(t) = A \cos(2\pi f^A t) + B \cos(2\pi f^B t)$
avec $f^A = 88$ Hz et $f^B \in [95, 104]$ Hz

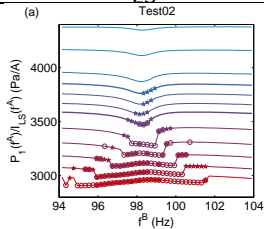
Pour chaque niveau source (A, B), on représente : $\frac{p_1}{p_1^L}$ et $\frac{p_2}{p_2^L}$ (RMS)
où p_1^L et p_2^L représentent la réponse RMS de la partie linéaire du système.



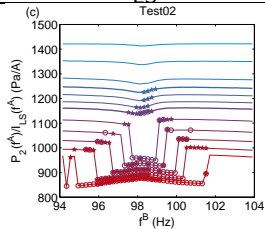
Observation : p_1 and p_2 (RMS) sont réduits simultanément par le NES.

$$f^A = 88 \text{ Hz}$$

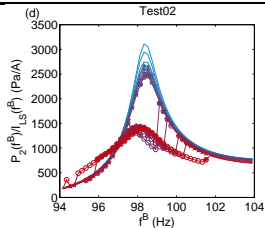
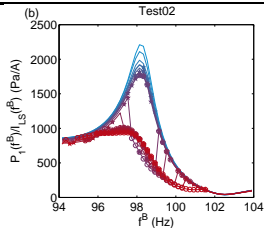
$$\frac{P_1}{I_{LS}}$$



$$\frac{P_2}{I_{LS}}$$



$$f^B$$



Action efficace simultanément sur les 2 modes (avec faible interaction)

Effet d'une perturbation harmonique

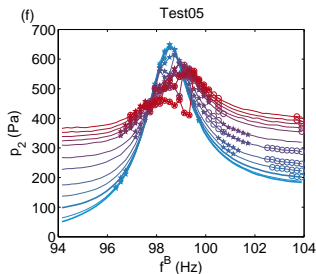
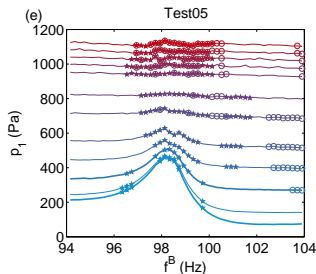
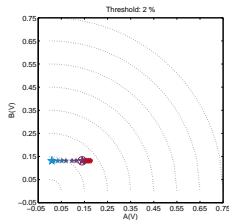
Test 5:

$$e(t) = A \cos(2\pi f^A t) + B \cos(2\pi f^B t)$$

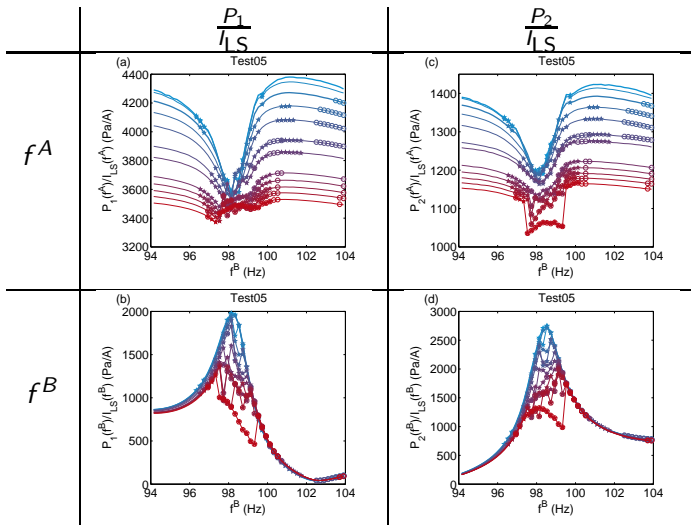
avec :

A croissant de 0 à 0.18, $f^A = 88$ Hz

B constant et $f^B \in [95, 104]$ Hz



Ajout de $A \cos(2\pi f^A t) =$ diminution (absolue) de p_2 à la résonance.



Ajout de $A \cos(2\pi f^A t)$: réponse à f^B divisée par 2 à la résonance

Seuils de déclenchement

Les niveaux de déclenchement du régime à forte v_m suivent-ils une fonction identifiable de A et B ?

Détection des transitions grâce à des critères de conversion de fréquences :

- faible v_m : réponses à f^A et f^B exclusivement, HCR (taux de conversion harmonique) nul
- forte v_m : réponses à f^A et f^B + leurs harmoniques $k_A f^A + k_B f^B$, HCR fort
- Autres régimes : fréquences autres que $k_A f^A + k_B f^B$ dans la réponse. NHCR (taux de conversion non harmonique) fort

HCR et NHCR sont basés sur l'évaluation du poids relatif du contenu fréquentiel des signaux (homogène à une variance).

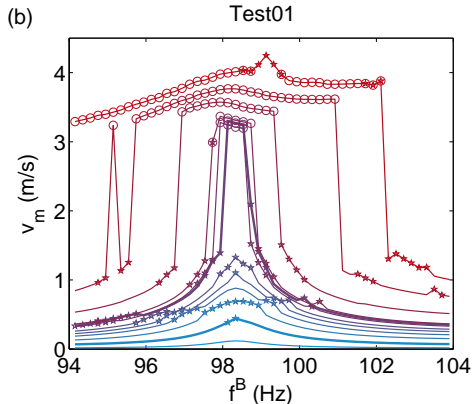
Test 1:

$$e(t) = B \cos(2\pi f^B t)$$

avec $f^B \in [95, 104]$ Hz

○ : HCR > 2%

★ : NHCR > 2%



Le critère à 2% (empirique) permet de détecter la transition entre les régimes de faible/forte amplitude de v_m

Test 2:

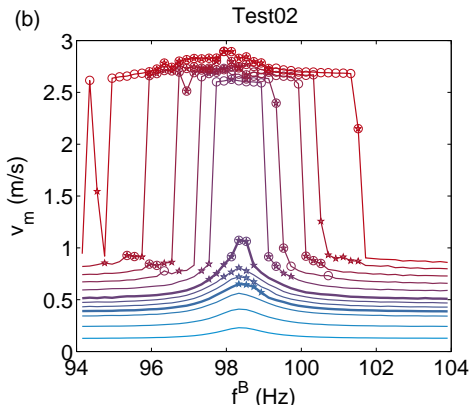
$$e(t) = A \cos(2\pi f^A t) + B \cos(2\pi f^B t)$$

avec $f^A = 88$ Hz et
 $f^B \in [95, 104]$ Hz

○ : HCR > 2%

★ : NHCR > 2%

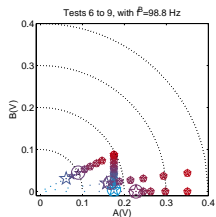
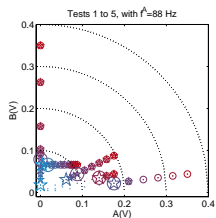
Critère à 2% toujours valable pour une excitation à 2 fréquences



Synthèse des mesures - Seuil linéaire en (A, B) ?

- Un point dans le plan (A, B) correspond à un scan en fréquence.
- Un symbole \circ (resp. \star) dans le plan (A, B) signifie qu'il existe au moins 1 des paires (f^A, f^B) où le HCR (resp. NHCR) dépasse 2%.
- Le symbole \bigcirc (resp. \star) correspond à la plus faible amplitude d'un test donné où le HCR (resp. NHCR) dépasse 2%.

Apparemment le seuil en HCR (\bigcirc) aurait une dépendance linéaire en (A, B) : effet d'amplitude cumulée plutôt que d'énergie ?



Conclusion

- Démonstration expérimentale de l'efficacité simultanée d'un NES sur 2 d.d.l. distincts excités autour de leurs fréquences de résonance
- Observation de capture de résonance multiple
- L'ajout d'une perturbation désaccordée améliore la performance du NES
- Présentation des outils d'analyse expérimentale HCR et NHCR
- Observation d'un lien (linéaire ?) entre composantes sources

Merci pour votre attention.

Conclusion

- Démonstration expérimentale de l'efficacité simultanée d'un NES sur 2 d.d.l. distincts excités autour de leurs fréquences de résonance
- Observation de capture de résonance multiple
- L'ajout d'une perturbation désaccordée améliore la performance du NES
- Présentation des outils d'analyse expérimentale HCR et NHCR
- Observation d'un lien (linéaire ?) entre composantes sources

Merci pour votre attention.