





# Un absorbeur de vibrations hybride non-linéaire : avec pilotage des non-linéarités

Louis Mesny, Sébastien Baguet and Simon Chesné

Université de Lyon, CNRS INSA-Lyon, LaMCoS UMR5259, F-69621,France

GDR EX-MODELI, BESANÇON, NOVEMBRE 2023

GdR EX-MODELI, Novembre 2023

### Sommaire

- 1. Contexte et motivations
- 2. Modélisation mathématique
- 3. Simulation numérique
- 4. Banc d'essai expérimental et Identification
- 5. Résultats expérimentaux
- 6. Synthèse, perspectives et améliorations

# Contexte et motivations

### Pourquoi un absorbeur hybride non-linéaire ?





Airplan wing [Wired]

#### Tuned mass damper

#### (contrôle passif) :

- Simple d'implémentation
- Mono-fréquentiel

#### Non-linéarités :

- Robustesse fréquentielle
- Robustesse en amplitude
- Points de bifurcations
- Seuil d'activation
- Solutions isolées

#### <u>Modification temps réel</u> (contrôle actif) :

- Optimisation temps réel
- Augmentation des performances
- Coût énergétique

Absorbeur hybride non-linéaire

• Débattement GdR EX-MODELI, Novembre 2023

10/11/2023

### Contexte et motivations

### <u>Objectif</u> : Contrôler le comportement global du système par la modification des paramètres de l'absorbeur non-linéaire grâce à la partie active : preuve de concept expérimentale

Équations de mouvement sans

dimensions pour le cas général :

Dérivée du temps par rapport au temps sans dimension  $au=\omega_0 t$ 

 $\{\ddot{x}_1 + x_1 + \lambda_1 \dot{x}_1 = \Gamma \sin(\Omega t)$ 





Termes de la mécanique linéaire

#### **Structure primaire**



#### Structure primaire +TMD

### Équations de mouvement sans

dimensions pour le cas général :

Dérivée du temps par rapport au temps sans dimension  $au=\omega_0 t$ 

$$\ddot{x}_1 + x_1 + \epsilon \lambda_1 \dot{x}_1 + \epsilon \lambda_2 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + \epsilon k_2 (x_1 - x_2)$$
  
=  $\epsilon \Gamma sin(\Omega t)$   
 $\ddot{x}_2 + \epsilon \lambda_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + \epsilon k_2 (x_2 - x_1)$   
= 0  
 $\epsilon = \frac{n}{2}$ 

$$\varepsilon = \frac{m_2}{m_1} \ll 1$$

Termes de la mécanique linéaire



#### TMD + non-linéarité

### Équations de mouvement sans

dimensions pour le cas général :

Dérivée du temps par rapport au temps sans dimension  $au=\omega_0 t$ 

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 + x_1 + \epsilon \lambda_1 \dot{x}_1 + \epsilon \lambda_2 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + \epsilon k_2 (x_1 - x_2) + \epsilon K_{nl} (x_1 - x_2)^3 \\ &= \epsilon \Gamma \sin(\Omega t) \\ \ddot{x}_2 + \epsilon \lambda_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + \epsilon k_2 (x_2 - x_1) + \epsilon K_{nl} (x_2 - x_1)^3 \\ &= 0 \\ &\epsilon = \frac{m_2}{m_1} \ll 1 \end{cases}$$
  
Termes de la mécanique linéaire



Non-linéarités géométriques (grands déplacements)



#### TMD + non-linéarité + contrôle actif

Équations de mouvement sans

dimensions pour le cas général :

Dérivée du temps par rapport au temps sans dimension  $au=\omega_0 t$ 

$$\ddot{x}_{1} + x_{1} + \epsilon \lambda_{1} \dot{x}_{1} + \epsilon \lambda_{2} (\dot{x}_{1} - \dot{x}_{2}) + \epsilon k_{2} (x_{1} - x_{2}) + \epsilon K_{nl} (x_{1} - x_{2})^{3}$$

$$= \epsilon \alpha F_{a} (X) + \epsilon \Gamma \sin(\Omega t)$$

$$\ddot{x}_{2} + \epsilon \lambda_{2} (\dot{x}_{2} - \dot{x}_{1}) + \epsilon k_{2} (x_{2} - x_{1}) + \epsilon K_{nl} (x_{2} - x_{1})^{3}$$

$$= -\epsilon \alpha F_{a} (X)$$

$$\epsilon = \frac{m_2}{m_1} \ll 1$$

Termes de la mécanique linéaire



Force active :  $F_a(X)$ 

$$X = x_1, x_2, \dot{x}_1, \dot{x}_2$$

Le slow invariant manifold (SIM) un outil pour la modélisation

### Case 1 : niveau d'effort faible

Le système ne dépasse pas le seuil. L'absorbeur ne se déclenche pas.

### Case 2 : niveau d'effort suffisant

Strong Modulated Response (SMR)

Le système dépasse le seuil. L'absorbeur se déclenche.





Le slow invariant manifold (SIM) un outil pour la modélisation

Slow invariant manifold (SIM) dans le domaine réel à partir des équations de mouvement :

### **Coordonnées barycentriques:**

 $V = x_1, Y = x_1 - x_2$ 

Modification des equations de mouvement

### Variables complexes :

$$\begin{split} \psi_1 &= \phi_1 e^{i\Omega\tau} = \dot{V} + \mathrm{i}\Omega V, \\ \psi_2 &= \phi_2 e^{i\Omega\tau} = \dot{Y} + i\Omega Y \\ \mathrm{with} \ i^2 &= -1 \end{split}$$

Étude de la dynamique lente ( $\epsilon^0$ )  $\phi_k = N_k e^{i\delta_k}$ 

Équation du SIM dans le domaine reel avec prise en compte de la loi de contrôle:

$$\sqrt{\left(\frac{N_2\lambda_2}{2} - \alpha\Re(F_a(N_2))\right)^2 + \left(\left(\frac{\Omega}{2} - \frac{K_2}{2\Omega} - \frac{3K_{nl2}}{8\Omega^3}N_2^2\right)N_2 - \alpha\Im(F_a(N_2))\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{N_1}{2\Omega} + \alpha\Im(F_a(N_1))\right)^2 + (\alpha\Re(F_a(N_1)))^2}$$

La loi de contrôle permet de donner des formes spécifiques au SIM et de modifier ses paramètres en temps réel 10/11/2023 GdR EX-MODELI, Novembre 2023

# Simulation numérique :

influence du contrôle sur le comportement d'un absorbeur hybride non-linéaire

Forme de la loi de contrôle

$$F_a(t) = k_{nlc}(x_2 - x_1)^3 + c_c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)$$



### Influence des paramètres

- *K<sub>nlc</sub>* : Modifie la position du <u>seuil d'activation ou désactivation</u>
- C<sub>c</sub>: Augmente ou diminue le <u>débattement de l'absorbeur</u>



### Présentation du banc d'essai



Hauteur = 50cm, largeur=25cm, <u>Premier mode de flexion</u>=12.7Hz, masse modale effective=9.42Kg

# Banc d'essai : absorbeur hybride non-linéaire

### Absorbeur hybride non-linéaire :



Accéléromètre

$$\epsilon = \frac{m_2}{m_1} \approx 7\%$$

Gestion de la non-linéarité



#### Gestion de la partie active



GdR EX-MODELI, Novembre 2023

# Banc d'essai : identification des non-linéarités



Identification du comportement non-linéaire de l'absorbeur

### Résultats expérimentaux : NES (passif)



### Résultats expérimentaux : modification de l'amortissement





10/11/2023

### Résultats expérimentaux :

modification de la raideur linéaire et non-linéaire



### Résultats expérimentaux : modification de la raideur linéaire

Forme de la loi de contrôle

 $F_a(t) = k_{nlc}(x_2 - x_1)^3 + c_c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_c(x_2 - x_1)$ 

L'utilisation d'une loi de contrôle complète permet de modifier le comportement dynamique de l'absorbeur



# Synthèse, Perspectives et Améliorations

### <u>Synthèse</u>

- Absorbeur adaptatif non-linéaire expérimental
- Non-linéarité générée par des cordes en acier
- Partie active générée par bobine mobile
- Slow invariant manifold avec prise en compte du contrôle actif
  - La forme du SIM peut être modifiée en temps réel pour s'adapter aux conditions de fonctionnement.

### **Limitations**

- Consommation énergétique
- Non-linéarité du coefficient de transduction électromagnétique

### Perspectives et améliorations

- Absorbeur de vibrations non-linéaire accordé [Habib15]
- Utilisation d'autres lois de commande pour dissiper l'énergie
- SIM avec non-linéarités multiples ou non-polynomiales





# Merci Pour Votre Attention !





10/11/2023

GdR EX-MODELI, Novembre 2023

Contact : louis.mesny@insa-lyon.fr

# Annexe(s)

INTERMITTENT FORCE @10% DUTY CYCLE	68.4 N	15.4 LB
CONTINUOUS FORCE	21.6 N	4.9 LB
FORCE CONSTANT	10.3 N/A	2.3 LB/A
BACK EMF CONSTANT	10.3 v/m/s	0.26 v/in/s
STROKE	31.8 mm	1.25 IN
COIL CLEARANCE PER SIDE	0.38 mm	0.015 IN
COIL ASSY MASS	165 GR	5.8 OZ
BODY MASS	405 GR	14.3 OZ
COIL RESISTANCE	6.3 Ohms	
COIL INDUCTANCE @120 Hz	11.9 mH	
MAX CONTINUOUS POWER	28.0 W	

ALL VALUES AT 25°C



# Annexe(s)

### Targeted Energy Transfert





### **Dimensionless parameters**

$$\epsilon = \frac{m_2}{m_1}; \omega_0 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}; \Omega = \frac{\omega}{\omega_0}; \tau = \omega_0 t; \lambda_1 = \frac{c_2}{m_2 \omega_0^2}; \lambda_2 = \frac{c_2}{m_2 \omega_0}; K_2 = \frac{k_2}{m_2 \omega_0^2}; K_{nl} = \frac{k_{nl}}{m_2 \omega_0^2}; \Gamma = \frac{F}{m_2 \omega_0^2}; \alpha = \frac{1}{m_2 \omega_0^2}; \alpha = \frac{$$