



**HAL**  
open science

## Structure à comportement non linéaire à paramètres pilotables

Jarir Mahfoud, Johan Der Hagopian, Zäzilia Seibold

► **To cite this version:**

Jarir Mahfoud, Johan Der Hagopian, Zäzilia Seibold. Structure à comportement non linéaire à paramètres pilotables. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-03390925

**HAL Id: hal-03390925**

**<https://hal.science/hal-03390925>**

Submitted on 21 Oct 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Structure à Comportement Non Linéaire à Paramètres Pilotables

Z. SEIBOLD<sup>a</sup>, J. DER HAGOPIAN<sup>a</sup>, J. MAHFOUD<sup>a</sup>

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

## Résumé :

*Certaines structures non linéaires sont dotées d'hystérésis responsables de phénomènes de saut dans les réponses fréquentielles et d'instabilités. L'étude concerne la conception et la réalisation d'une structure dont le comportement non linéaire est modifiable. Il s'agit d'une poutre encastree libre, la non linéarité est introduite par des actionneurs électromagnétiques. La structure ainsi que les actionneurs sont dimensionnés afin de mettre en évidence ce phénomène d'hystérésis. Les résultats obtenus en simulations numériques et en expérimentations, montrent la possibilité de maîtriser le phénomène de saut dans les réponses fréquentielles par l'utilisation des actionneurs électromagnétiques.*

## Abstract :

*Some nonlinear structures present hysteresis that leads to instabilities and it is responsible for phenomena of jump up or jump down in forced frequency response. The study deals with the design and the realization of a structure whose nonlinear behaviour can be modified. The chosen structure is a free clamped beam; the non linearity is introduced by using electromagnetic actuators. The structure and the actuators are dimensioned in order to highlight this hysteresis phenomenon. The results obtained in numerical simulations and experiments show the possibility of controlling this phenomenon of frequency forced response jump by using the electromagnetic actuators.*

**Mots clefs :** non linéaire, vibration, hystérésis, actionneur électromagnétique, expérimentation

## 1 Introduction

Le progrès réalisé dans différents domaines de l'ingénierie fait que les systèmes mécaniques modernes opèrent dans des conditions où les couplages multi physiques jouent un rôle important, et font apparaître des comportements non linéaires qu'il faut considérer lors de l'étape de la conception. Les tendances actuelles concernent l'augmentation du rendement et de la fiabilité, la diminution des dimensions, des coûts d'exploitation et des impacts environnementaux. Les machines doivent donc opérer dans des conditions respectant les normes de sécurité, de sûreté, de confort et d'environnement.

Le comportement non linéaire d'un système mécanique peut se manifester sous différentes formes [1 et 2]. A titre d'exemple, dans le secteur automobile, les équations de mouvements des vibrations latérales d'un système d'entraînement par courroies peuvent mener à un régime oscillatoire avec des excitations paramétriques régit par les équations de Duffing [3]. Réduire l'impact de ce type de comportement nécessite une compréhension des phénomènes de base à la fois analytiquement et expérimentalement. Il est donc important de pouvoir contrôler les vibrations à grandes amplitudes, de déterminer des critères de stabilité ou de supprimer l'hystérésis responsable des phénomènes de saut dans les systèmes vibratoires. Des résultats analytiques récents ont montré que l'introduction d'une excitation à haute fréquence dans un système vibratoire peut avoir un effet sur l'élimination de l'hystérésis [4 et 5].

D'autre parts, les paliers magnétiques actifs (PMA) ont montrés leurs efficacités dans plusieurs applications industrielles. Ils ont l'avantage d'opérer sans contact et ils peuvent être utilisés dans des applications nécessitant une propreté absolue ou dans des milieux corrosifs [6]. Les PMA ont également l'avantage de pouvoir agir sur l'arbre directement ou indirectement en les associant à des paliers classiques, dans ce cas les PMA agissent comme des actionneurs [7 et 8].

L'objectif de cette étude est la conception et la réalisation d'un banc de simulation simple et fiable, dont le comportement est non linéaire et pilotable, permettant de mettre en évidence les phénomènes de saut dans les réponses fréquentielles et d'instabilités. La non linéarité est introduite par une force générée par une ligne d'action électromagnétique composée de deux électroaimants placés de part et d'autre de la poutre et parcourus par un même courant continu constant. Cette force est la somme des deux forces électromagnétiques générées par les deux actionneurs: chacune dépend de l'inverse du carré du déplacement de la poutre au niveau de l'actionneurs. La possibilité de rendre le système non linéaire avec cette force est tout d'abord examinée par simulations numériques puis par expérimentation.

Le travail est organisé en plusieurs sections; après la description du banc et de la ligne d'action, les résultats de simulations numériques ensuite des expérimentations sont discutés et les conclusions et perspectives sont dressées en fin.

## 2 Description du banc d'essai

Le banc d'essai (Fig.1) est constitué d'une poutre en acier de section constante (5 mm d'épaisseur et 30 mm de largeur) encastrée à une extrémité et libre à l'autre. La raideur non linéaire est apportée par une ligne d'action, composée de deux actionneurs électromagnétiques, parcourus par un courant constant. L'ensemble est monté sur un bâti en acier. Le banc est conçu afin d'avoir un positionnement précis et facile de l'actionneur et de son entrefer. Dans cette étude, l'actionneur est placé à 300 mm de l'encastrement de sorte à avoir suffisant d'influence et à éviter des déplacements supérieurs à la valeur de l'entrefer pour la plage fréquentielle étudiée.

Le déplacement est mesuré par un capteur sans contact de type Vibrometer TQ 102, l'excitation harmonique est appliquée en utilisant un pot électromagnétique du type B&K 4810. Le pot d'excitation est placé sur une suspension souple et fixé sur la poutre en un point proche de l'encastrement afin d'éviter toute modification de la dynamique de la structure étudiée.

L'acquisition et le traitement des signaux sont effectués à l'aide d'un analyseur de spectre de type Agilent 25670A.

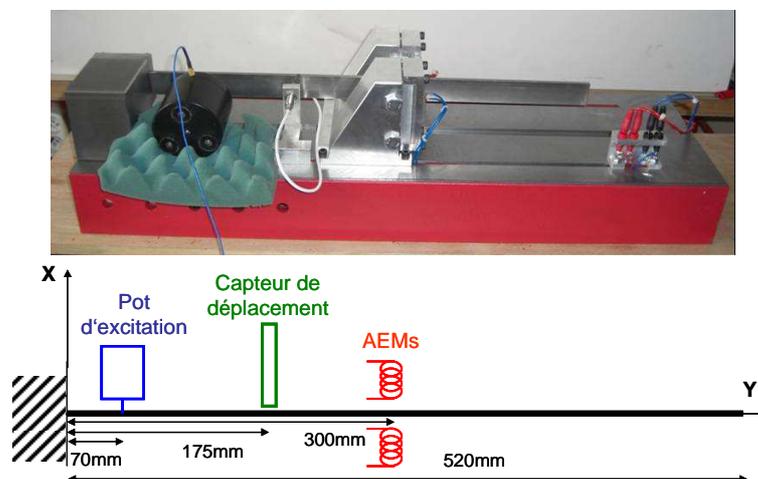
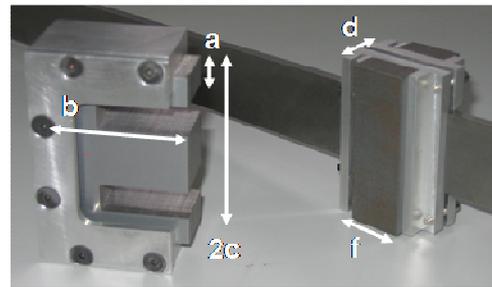


FIG. 1 – Banc d'essai

### 2.1 Caractérisation de l'actionneur

Un AEM peut seulement générer des forces d'attraction, ainsi deux actionneurs de caractéristiques identiques commandés simultanément sont nécessaires pour symétriser leurs effets sur la poutre. Chaque AEM se compose de deux assemblages de tôles ferromagnétiques isolées, le premier est en forme de (E) qui reçoit la bobine et le second en forme de (I) qui est fixé directement sur la poutre. L'entrefer nominal ( $e$ ) entre ces deux assemblages est choisi suffisamment petit afin que les pertes magnétiques soient négligeables. La description géométrique des actionneurs est récapitulée sur la figure (2).



$a=10$  mm  
 $b=40$  mm  
 $c=30$  mm  
 $d=10$  mm  
 $f=21$  mm  
 $N=180$  spires

FIG. 2 – Détails de l'actionneur électromagnétique

Les actionneurs sont conçus pour délivrer une force d'attraction maximale de 300 N pour un courant maximum admissible de 3 A. Ils délivrent des forces d'attraction dont les amplitudes sont fonction du courant qui les parcourt. Ce courant est pilotable et peut être variable ou constant, dans cette étude le courant est constant. A partir des théorèmes classiques de circuits magnétiques et électromagnétiques, et en supposant un flux magnétique conservatif et de pertes négligeables, la relation qui relie la force électromagnétique ( $F_{em}$ ) au courant ( $I$ ) et au déplacement colocalisé avec l'actionneur  $\delta_a(t)$  peut s'écrire sous la forme :

$$F_{em} = \frac{N^2 \mu_0 a f I^2}{2 \left( (e \pm \delta_a(t)) + \frac{b+c+d-2a}{\mu_r} \right)^2} \quad (1)$$

(a, b, c, d et f) correspondent aux caractéristiques géométriques des actionneurs.  $\mu_0$  est la perméabilité du vide ( $4\pi \times 10^{-7}$  H/m),  $\mu_r$  est la perméabilité relative (sans dimensions) qui dépend de l'entrefer et qui peut varier en fonction de la température. Sa valeur est basée sur les données des constructeurs. Sa valeur a été déterminée expérimentalement [9] en faisant les mesures de la force générée en fonction d'un balayage en courant (en montée et en descente) pour différentes valeurs d'entrefer (Fig. 3). La valeur utilisée dans cette étude est de 740.

Les mesures obtenues montrent que la force varie en fonction de la valeur au carré du courant, et que les effets d'hystérésis dus au champ électromagnétique peuvent être considérés comme négligeables.

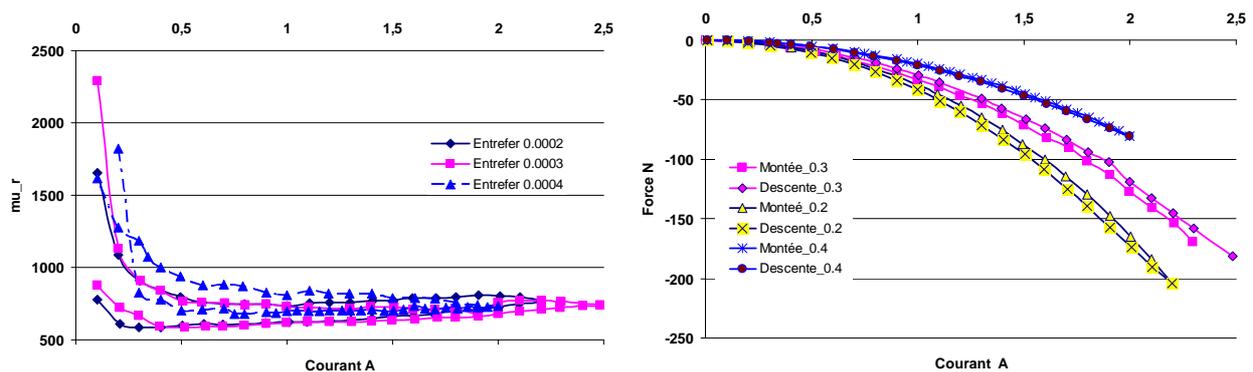


FIG. 3 – Perméabilité magnétique relative et forces en fonction du courant pour différents entrefers

### 3 Etude numérique

Cette étape est essentielle afin d'évaluer l'influence des paramètres des actionneurs (courant et entrefer) sur le comportement de la structure et la possibilité d'introduire des instabilités dues aux phénomènes d'hystérésis. Le bâti et l'encastrement sont modélisés par des masses infiniment rigides, la poutre est modélisée par 20 éléments de poutre de Timoshenko avec 5 degrés de liberté par noeud, 3 déplacements et 2 rotations (suivant

les directions X et Z). L'équation générale qui régit le comportement s'écrit classiquement comme suite [10]:

$$M \ddot{\delta} + C \dot{\delta} + K \delta = F_{\text{extérieure}} + F_{em} \quad (2)$$

avec  $M$ ,  $C$  et  $K$  matrices de masse, amortissement visqueux et raideur.  $\delta$  le déplacement et  $F_{\text{extérieure}}$  l'excitation externe et l'effet de l'AEM est pris en compte dans le second membre. Cette force varie en fonction du déplacement colocalisé avec l'actionneur  $\delta_a(t)$  et peut se mettre sous la forme:

$$F_{em} = \frac{\text{Constant1}}{(\text{Constant2} + \delta_a(t))^2} \quad \text{ou} \quad F_{em} = \frac{\text{Constant1}}{(\text{Constant2} - \delta_a(t))^2} \quad (3)$$

L'objectif des simulations est d'observer le comportement dynamique autour de la première fréquence propre du système. Les calculs sont réalisés à partir d'un modèle de la structure souple obtenue par réduction modale sur les huit premiers modes. Un facteur d'amortissement visqueux modal de 0.005 est utilisé pour tous les modes. Les simulations numériques sont réalisées sous l'environnement Matlab® et Simulink®. Le schéma général des calculs est présenté dans la figure (4). La réponse de la structure (en temps réel) est calculée au noeud #7 (position du capteur de déplacement). La force extérieure est un balayage sinus d'amplitude 0.1 N et dont la fréquence décroît de 5 Hz au delà de la première fréquence de résonance à 5Hz au dessus. La durée de simulations est de 200 secondes.

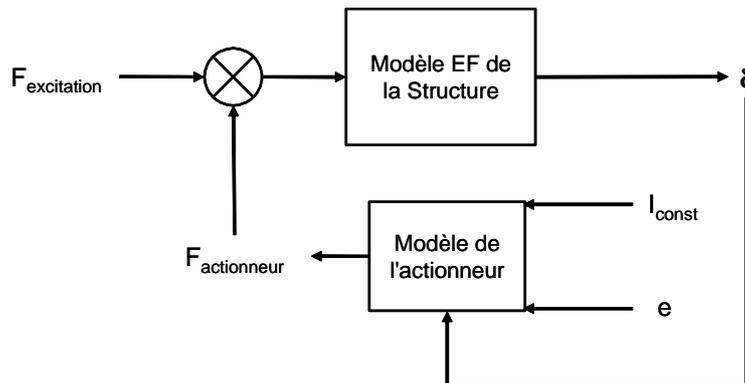


FIG. 4 – Schéma général des simulations

Tout d'abord, la réponse de la structure est calculée pour un courant constant de 1 A et pour différentes valeurs d'entrefer (Fig. 5a). Pour des valeurs relativement petites d'entrefer (1 et 1.02 mm) le phénomène de saut d'amplitude peut être observé très nettement avec un comportement très instable. Au fur et à mesure que l'entrefer augmente cette instabilité diminue tout en gardant le phénomène de saut d'amplitude. Il est à noter également que la fréquence de résonance glisse vers les faibles valeurs, les AEM ont donc un effet mollissant. Pour des valeurs importantes d'entrefer (1.4 mm) le phénomène de saut d'amplitude n'est plus tellement marqué par contre avec la fréquence de résonance qui glisse toujours vers les faibles valeurs.

Ensuite, la réponse de la structure est calculée pour un entrefer constant de 1.2 mm et pour différentes valeurs de courant (Fig. 5b). Ici, plus le courant est important plus le phénomène de saut est marqué avec un comportement instable et un glissement des fréquences vers des valeurs inférieures.

Ici, les résultats des simulations montrent qu'il est possible effectivement d'avoir une structure à comportement non linéaire doté d'hystérésis et dont les paramètres peuvent être pilotés par des actionneurs électromagnétiques.

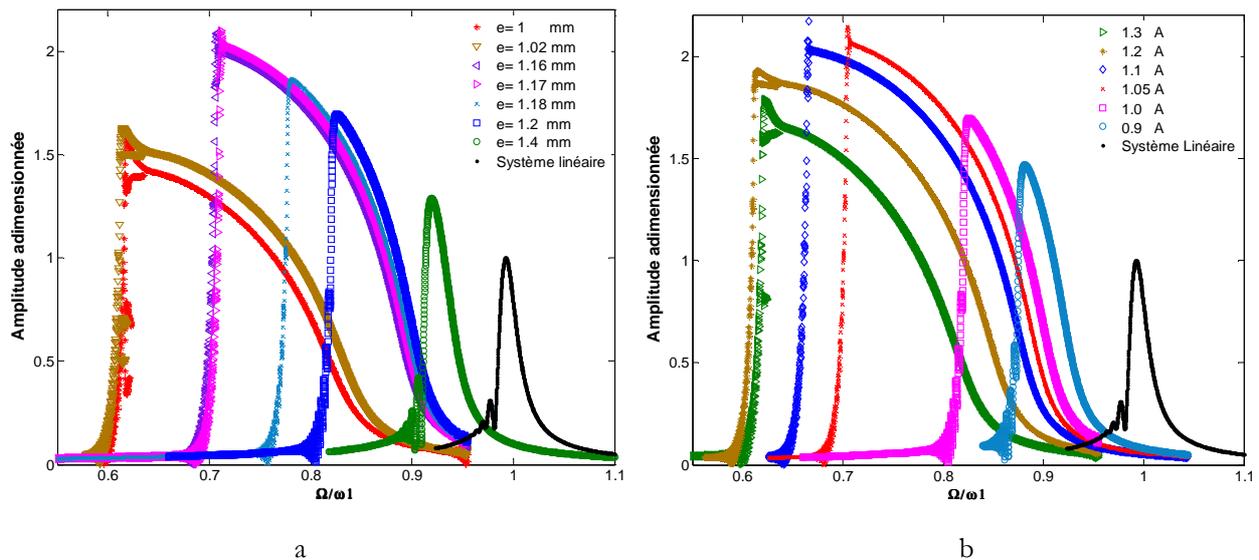


FIG. 5 – Réponse de la structure en fonction des variations de l'entrefer et du courant.

#### 4 Etude expérimentale

Afin de valider les résultats obtenus précédemment, un balayage sinus (entre 5 et 20 Hz) en utilisant le pot d'excitation (Fig. 1) est réalisé dans la configuration 1 mm d'entrefer et 0.5 A. Le positionnement de l'actionneur sur la poutre a été choisi pour que l'amplitude de la force d'excitation puisse être considérée comme constante pendant la durée de expériences.

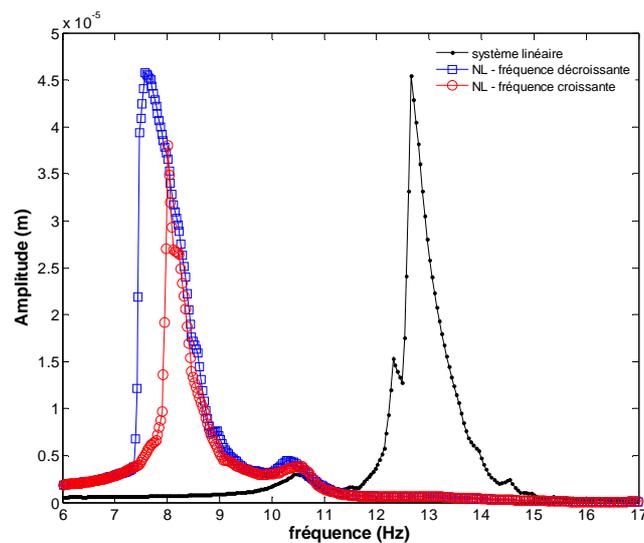


FIG. 6 – Déplacements mesurés en fonction d'un balayage croissant et décroissant de l'excitation.

Les déplacements mesurés en fonction d'un balayage sinus (croissant ou décroissant) de la force d'excitation montrent la présence de saut d'amplitude dû au phénomène d'hystérésis. Il est à noter que les actionneurs ont un effet mollissant sur le comportement dynamique de la structure dans cette gamme fréquentielle. Plusieurs répétitions de mesures sont réalisées, et la structure se comporte d'une façon identique.

#### 5 Conclusions

L'étude présentée ici concerne la conception et la réalisation d'une structure à comportement non linéaire dont la non linéarité est introduite par des actionneurs électromagnétiques, l'objectif est de mettre en évidence les phénomènes d'hystérésis responsables de saut d'amplitude dans les réponses fréquentielles.

Les résultats obtenus montrent qu'il est possible d'avoir une structure non linéaire et la possibilité de piloter ces phénomènes de saut d'amplitude en faisant varier les caractéristiques des actionneurs électromagnétiques. Les actionneurs ont un effet mollissant sur le comportement dynamique de la structure pour la

gamme fréquentielle étudiée. Ce glissement de la fréquence de résonance peut être également piloté par les actionneurs ce qui ouvre des perspectives multiples dans le domaine du contrôle actif des structures flexibles.

Les résultats présentés ici sont une première étape dans un programme de recherche où l'objectif est le contrôle des phénomènes de saut d'amplitude par l'application d'une excitation haute fréquence.

## References

- [1] Virgin L.N., Introduction to experimental nonlinear dynamics, Cambridge University Press 2000, p 256.
- [2] Nayfeh, A. H., and Mook, D. T., 1995, Nonlinear Oscillations, Wiley, New York, p 704.
- [3] Michon G., Manin L, Parker R. G., Dufour R, 2008, Duffing oscillator with parametric excitation : analytical and experimental investigation on a belt-pulley system, ASME Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 3, 031001, 8p.
- [4] M. Belhaq and A. Fahsi, 2:1 and 1:1 frequency-locking in fast excited van der Pol-Mathieu-Duffing oscillator, Nonlinear Dynamic, vol. 53, p. 139-152, 2008.
- [5] A. Fahsi, M. Belhaq and F. Lakrad, Suppression of hysteresis in a forced van der Pol-Duffing oscillator, Commun Nonlinear Sci Numer Simul, doi:10.1016/j.cnsns.2008.03.003
- [6] Schweitzer, G., Bleuler, H., and Traxler, A., 2003, "Active Magnetic Bearings - Basics, Properties and Applications", vdf Hochschulverlag AG, ETH, Zurich.
- [7] El-Shafei, A., and Dimitri, A.S., 2007, Controlling journal bearing instability using active magnetic bearings, Proceedings of ASME Turbo Expo, GT2007-28059, Canada.
- [8] Skladanek, Y., Der Hagopian, J. and Mahfoud, J., Energy Cost of the Active Control of Rotating Machine by Using Electromagnetic Actuator and Piezoelectric Actuator, ASME Gas Turbine Technical Congress & Exposition, June 8-12, 2009, Orlando, Florida, USA.
- [9] J. Der Hagopian and J. Mahfoud, Numerical and Experimental Investigation of the Active Control by Using Electromagnetic Actuator, Proceedings of the XIII International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics (DINAME 2009), Almeida, C. A. (Editor), ABCM, Angra dos Reis, RJ , Brazil, March 2nd - March 6th, 2009.
- [10] M. Lalanne, P. Berthier and J. Der Hagopian, Mechanical Vibrations for Engineers, Wiley Interscience Publication, p 266.