

Modélisation et validation d'une méthode de réduction de vibrations mécaniques par effet piézo-électrique

Passionné par les sciences appliquées et la physique expérimentale, j'ai choisi d'étudier une méthode de réduction des vibrations dans les systèmes mécaniques, notamment aéronautiques. Ce travail associe modélisation théorique et équivalent électrique afin de valider la méthode en exploitant le couplage électromécanique de l'effet piézoélectrique.

Ce sujet s'inscrit dans le thème « Cycles et boucles » par l'étude d'oscillations mécaniques, phénomènes périodiques. La méthode de réduction vibratoire repose sur une boucle de rétroaction électromécanique et met en jeu des cycles d'échanges d'énergie ainsi que des phénomènes d'hystérésis dans un système physique couplé.

Le candidat atteste avoir travaillé en monôme.

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *PHYSIQUE (Physique Interdisciplinaire)*
- *PHYSIQUE (Physique de la Matière)*
- *INFORMATIQUE (Informatique pratique)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français)

Transducteur piézoélectrique
Amortissement par commutation synchrone sur inductance
Modélisation électromécanique
Boucles de rétroaction
Contrôle semi-actif des vibrations

Mots-clés (en anglais)

Piezoelectric transducer
SSDI
Electromechanical modeling
Feedback loops
Semi-active vibration control

Bibliographie commentée

Beaucoup de structures mécaniques sont soumises à des vibrations qui, lorsqu'elles deviennent trop importantes, peuvent dégrader leurs performances et réduire leur durée de vie. Dans les

moteurs aéronautiques, les disques aubagés dans les compresseurs constituent un exemple critique, car leurs vibrations peuvent s'amplifier et nécessitent donc des méthodes spécifiques de stabilisation. La réduction des vibrations constitue ainsi un enjeu essentiel de performance et de fiabilité des structures mécaniques industrielles ou des engins, qu'il s'agisse de moteurs, de compresseurs, d'ailes d'avion, de poutres ou d'autres systèmes mécaniques.

De manière générale, le contrôle des vibrations peut être passif ou actif. Les solutions passives reposent sur des éléments mécaniques ou dissipatifs dont les propriétés sont fixes, tandis que le contrôle actif agit en temps réel sur la structure au moyen d'une boucle de commande (les différentes techniques du contrôle vibratoire sont présentées dans [2], [6]). Par contre, le contrôle actif fait parfois intervenir une grande quantité d'énergie. Entre ces deux approches, les méthodes semi-actives, notamment le shunt piézoélectrique, constituent un compromis intéressant : l'énergie vibratoire est convertie en énergie électrique par des matériaux piézoélectriques, puis dissipée ou réinjectée via des circuits adaptés (shunts résistifs, RL, capacités négatives, ou techniques à commutation synchronisée de type SSDI, SSDNC). Ces méthodes ont montré une grande efficacité pour le contrôle multimodal et une bonne robustesse vis-à-vis des variations fréquentielles, en particulier dans les structures aéronautiques légères. En particulier, le SSDI (*Synchronized Switch Damping on Inductor*) [1] agit par commutation synchrone sur chaque cycle de vibration, technique implémentée notamment par [1] Zhang, F., Li, L., Fan, Y., & Liu, J.

Dans ce cadre, l'effet piézoélectrique constitue un outil particulièrement adapté, car il assure un couplage direct entre les domaines mécanique et électrique. Les matériaux piézoélectriques convertissent les déformations de la structure en grandeurs électriques exploitables, ce qui permet d'intervenir sur la dynamique vibratoire sans modifier significativement la masse ou la géométrie de la structure. Afin d'analyser une telle méthode, je mets en œuvre une modélisation électromécanique. Cette approche offre un cadre plus fluide pour représenter les phénomènes de couplage et permet d'explorer l'influence des paramètres réels, facilitant ainsi l'étude et l'optimisation de la technique en question. De ce fait, différentes modélisations ont été explorées par **Stéphane Durand et Hervé Lissek** [5], ainsi que dans l'article [3] *Le Transformateur Piézoélectrique*.

L'étude se focalise sur l'étude de la méthode SSDI [1], en la modélisant de manière équivalente dans le domaine électrique, puis en validant cette modélisation par la mise en œuvre pratique du montage électrique. Cette étude peut donc être utile pour un calcul préalable des dimensions et des paramètres optimaux pour la mise en œuvre d'un tel système réel.

Ainsi, ce sujet permet de mettre en évidence les avantages d'une telle technique, de voir son efficacité par rapport à un contrôle passif et de comparer son apport énergétique avec des méthodes purement actives, tout en ayant la possibilité d'ajuster les différents paramètres afin d'obtenir des conditions *ad hoc* pour la réalisation de la technique sur un véritable système vibrant.

Problématique retenue

Comment modéliser et valider la méthode SSDI dans le cadre de la réduction semi-active d'un système vibrant?

Objectifs du TIPE du candidat

1-modéliser la vibration d'une structure et le couplage piézo-électrique.

2-explorer le principe de la méthode SSDI

3-montrer son efficacité à travers un montage électrique équivalent

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

[1] ZHANG, F., LI, L., FAN, Y., & LIU, J : Dual-Connected Synchronized Switch Damping for Vibration Control of Bladed Disks in Aero-Engines. : *Applied Sciences*, vol. 10, no 4, article 1478, 2020. DOI : 10.3390/app10041478

[2] YAN, B., WANG, K., HU, Z., WU, C., & ZHANG, X : Shunt Damping Vibration Control Technology: A Review. : *Applied Sciences*, vol. 7, no 5, article 494, 2017. DOI : 10.3390/app7050494

[3] DEJAN VASIC, SANDRINE HALLAERT, EMMANUEL SARRAUTE, FRANÇOIS COSTA :] Le Transformateur Piézoélectrique, Principe et Applications : HAL Id: hal-00811664 <https://hal.science/hal-00811664v1>

[4] JAN G. SMITS, SUSAN I, DALKEB AND THOMAS IL COONEY :] The constituent equations of piezoelectric bimorphs : *Department of Electrical Engineering Boston University, Boston, MA 02215 (U.S.A.)* bAnalog Devices, Wdmington, h 01887 (USA.)

[5] STÉPHANE DURAND ET HERVÉ LISSEK : La transduction piézoélectrique : https://electroacoustique.univ-lemans.fr/cours/Grain3.4/co/grain_03.html

[6] A. PREUMONT : Vibration damping with negative capacitance shunts: Theory and experiment Article in Smart Materials and Structures : *Article in Smart Materials and Structures* · June 2008 DOI: 10.1088/0964-1726/17/3/035015

DOT

[1] : [Avril–Mai 2025] : Recherche bibliographique sur les matériaux piézoélectriques, leurs propriétés électromécaniques et leurs applications dans le contrôle vibratoire. Étude des principales stratégies d'amortissement passif, semi-actif et actif utilisant des transducteurs piézoélectriques.

[2] : [Juin–Juillet 2025] : Découverte et étude approfondie de la technique SSDI (Synchronized Switch Damping on Inductor). Analyse de son principe de fonctionnement, de l'inversion synchrone de tension et des mécanismes de dissipation d'énergie associés.

[3] : [Octobre–Novembre 2025] : Recherche et élaboration de modèles électromécaniques du système. Étude de différentes représentations équivalentes du piézoélectrique, notamment le modèle de transformateur électromécanique permettant de décrire le couplage entre les domaines mécanique et électrique.

[4] : [Février–Mars 2026] : Rédaction de la partie théorique et modélisation du système. Première mise en œuvre expérimentale du circuit SSDI. Plusieurs solutions de commutation électronique (MOSFET, portes CMOS) ont été étudiées et testées avant d'être écartées au profit d'une solution plus adaptée.

[5] : [Mai 2026] : Recherche et caractérisation d'un dispositif de commutation répondant aux contraintes de synchronisation du SSDI. Sélection du commutateur analogique CD4066BE puis réalisation et validation du montage expérimental.

[6] : [Juin 2026] : Exploitation des résultats expérimentaux, comparaison des performances d'amortissement obtenues et finalisation de la présentation. Analyse du compromis entre efficacité de réduction des vibrations, consommation énergétique et complexité de mise en œuvre des différentes stratégies de contrôle.