

Sujet de thèse

## Conception et commande d'un transducteur vibratoire paramétrique piézoélectrique. Applications aux nano-systèmes, à la récupération d'énergie et aux interfaces haptiques

### Aspects pratiques

*Lieu* : Campus de Lille des Arts et Métiers (8 bd. Louis XIV 59000 Lille)

*Laboratoires* :

Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Physiques et Numériques (LISPEN)

Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de Puissance de Lille (L2EP)

*Encadrement* : Olivier THOMAS, Christophe GIRAUD-AUDINE, Simon BENACCHIO

*Rémunération* : Allocation école doctorale

*Dates* : 36 mois à partir de octobre 2021

*Contacts* : [olivier.thomas@ensam.eu](mailto:olivier.thomas@ensam.eu), [christophe.giraud-audine@ensam.eu](mailto:christophe.giraud-audine@ensam.eu),

[simon.benacchio@ensam.eu](mailto:simon.benacchio@ensam.eu)

<https://lispen.artsetmetiers.fr/user/87>

### Contexte

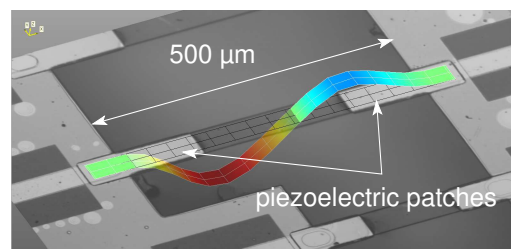
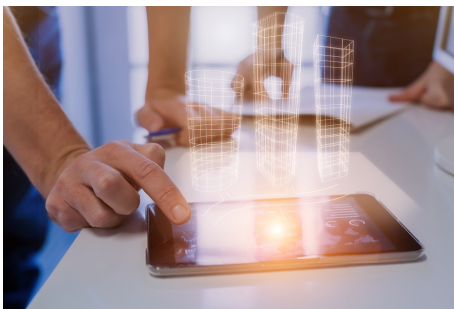


FIG. 1 – Interface à retour tactile et microsystème piézoélectrique vibrant

Une vibration paramétrique est obtenue sur un système mécanique résonant lorsqu'une action extérieure permet de faire varier périodiquement l'un des paramètres de ce système, à une fréquence en général double d'une fréquence de résonance. Deux exemples communs d'excitation paramétrique méritent d'être cités : la mise en oscillation d'une balançoire par son occupant ou l'encensoir *botafumeiro* de la cathédrale de Saint-Jacques de Compostelle en Espagne. Lors d'une excitation paramétrique, on obtient en général une **réponse résonante très forte**, liée à une instabilité et à des non linéarités. Dans ce sujet de thèse, on cherche à mettre à profit cette propriété pour des applications de **récupération d'énergie vibratoire**, de micro/nano systèmes électromécaniques (**M/NEMS**) ou pour actionner des **interfaces haptiques**.

Les matériaux piézoélectriques permettent de coupler, naturellement et de manière réversible, les déformations d'une structure mécanique à un circuit électrique. Ils sont utilisés dans beaucoup de systèmes comme capteurs ou actionneurs (accéléromètres, sonars, résonateurs d'horloges...). Pour des applications de récupération d'énergie vibratoire ambiante, ils permettent de transformer les oscillations mécaniques d'un résonateur en énergie électrique, qui peut être utilisée ou stockée. Pour les dispositifs haptiques, ils permettent de créer des vibrations mécaniques localisées sur une surface tactile. Pour des applications N/MEMS, on peut citer l'application des transducteurs ultrasoniques (Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducer, PMUT en anglais), pour des applications d'imagerie médicale (échographie).

**Dans ce contexte, ce sujet de thèse vise à lever plusieurs verrous scientifiques, à la fois sur les outils de simulation du comportement vibratoire de ces systèmes, intrinsèquement non linéaires, mais aussi sur les stratégies de commande pour l'utilisation des propriétés des résonances paramétriques.**

## Sujet de thèse

Les géométries typiques des résonateurs piézoélectriques à l'étude sont des structures minces (poutre ou plaque) munies de un ou plusieurs patches piézoélectriques, constitués d'une couche piézoélectrique et de deux électrodes. Ces systèmes comportent plusieurs caractéristiques : (1) une structure stratifiée, avec plusieurs couches de propriétés mécaniques différentes empilées, sujettes parfois à des contraintes résiduelles ; (2) une géométrie mince, qui conduit à une faible raideur dans la direction transverse et qui occasionne des grands déplacements pour des efforts modérés et donc des effets non linéaires géométriques ; (3) le couplage piézoélectrique à un circuit électronique de commande.

Parmi les enjeux et apports attendus de cette thèse, il y a :

- la production et l'exploitation des modèles permettant de prédire la réponse paramétrique d'une structure, grâce à une action soit mécanique, soit piézoélectrique. Ces modèles seront analytiques dans le cas de géométries simples soit numériques par la méthode des éléments finis [1]. Dans ce cadre, les verrous à lever l'effet de la stratification et la prise en compte de non-linéarités (matérielles et géométriques).
- l'analyse et l'optimisation des résonateurs piézoélectriques vis-à-vis de la vibration paramétrique. Plusieurs questions sont encore en suspens : quelles sont les performances d'un transducteur paramétrique piézoélectrique ? quelle est la géométrie optimale des couches piézoélectriques ? Sur ce point, les trois applications visées (récupération d'énergie, amplification paramétrique pour les M/NEMS, autorésonance pour les dispositifs haptiques) pourront être considérées.
- la conception d'électroniques de commande adaptées. En particulier, la stratégie de commande devra surmonter les seuils de démarrage des vibrations et entretenir des cycles limites, soit pour l'actionnement en amplification paramétrique et/ou en autorésonance, soit pour la récupération d'énergie.

Tous ces travaux comporteront à la fois de la **théorie** (modélisation, réponse paramétrique) des **simulations numériques** (éléments finis, matlab) et des tests dans un environnement **expérimental** fort (vibromètres laser, table vibrante).

## Encadrement

L'encadrement sera effectué entre le LISPEN, à travers O. Thomas et S. Benacchio, et le L2EP, avec C. Giraud-Audine, au campus de Lille des Arts et Métiers. O. Thomas possède une solide expertise en conception, calcul et mesure de systèmes non linéaires électromécaniques vibrants [2]. Précisément, ce sujet de thèse s'inscrit dans la continuité d'une thèse récente sur

les vibrations non linéaires de systèmes piézoélectriques [1] et dans les spécialités du laboratoire : la réduction de modèle par le concept de modes non linéaires [3, 4, 5, 6], la modélisation de structures piézoélectriques [7, 8, 9], les méthodes numériques de continuation de solutions périodiques [10], la continuation expérimentale [11, 12]. Au L2EP, C. Giraud-Audine est expert en électronique de puissance, contrôle de vibrations, électronique numérique et analogique et commande modale de transducteurs piézoélectriques [13, 14, 15].

## Bibliographie

- [1] A. Givois. *Analyse numérique et expérimentale de vibrations non linéaires géométrique de structures élastiques et piézoélectriques. Modèles réduits et interactions modales*. PhD thesis, Arts et Métiers, 2019. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02596754v1>.
- [2] O. Thomas. *Dynamique linéaire et non linéaire de structures élastiques et piézoélectriques*. Mémoire d’Habilitation à diriger des recherches, École Normale Supérieure de Cachan, November 2011. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00718727>.
- [3] C. Touzé, O. Thomas, and A. Chaigne. Hardening/softening behaviour in non-linear oscillations of structural systems using non-linear normal modes. *Journal of Sound Vibration*, 273(1-2) :77–101, 2004.
- [4] A. Givois, A. Grolet, O. Thomas, and J.-F. Deü. On the frequency response computation of geometrically nonlinear flat structures using reduced-order finite element models. *Nonlinear Dynamics*, 97(2) :1147–1781, 2019.
- [5] A. Vizzaccaro, A. Givois, P. Longobardi, Y. Shen, J.-F. Deü, L. Salles, C. Touzé, and O. Thomas. Non-intrusive reduced order modelling for the dynamics of geometrically nonlinear flat structures using three dimensional finite elements. *Computational Mechanics*, 66 :1293–1319, 2020.
- [6] A. Givois, J.-J. Tan, C. Touzé, and O. Thomas. Backbone curves of coupled cubic oscillators in one-to-one internal resonance : bifurcation scenario, measurements and parameter identification. *Meccanica*, 55 :581–503, 2020.
- [7] O. Thomas, J.-F. Deü, and J. Ducarne. Vibration of an elastic structure with shunted piezoelectric patches : efficient finite-element formulation and electromechanical coupling coefficients. *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, 80(2) :235–268, 2009.
- [8] J. Ducarne, O. Thomas, and J.-F. Deü. Placement and dimension optimization of shunted piezoelectric patches for vibration reduction. *Journal of Sound and Vibration*, 331(14) :3286–3303, 2012.
- [9] D. Saya, D. Dezest, A. J. Welsh, F. Mathieu, O. Thomas, T. Leïchlé, S. Trolier-McKinstry, and L. Nicu. Piezoelectric nanoelectromechanical systems integrating microcontact printed lead zirconate titanate films. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 30 :035004, 2020.
- [10] L. Guillot, A. Lazarus, O. Thomas, C. Vergez, and B. Cochelin. A purely frequency based floquet-hill formulation for the efficient stability computation of periodic solutions of ordinary differential systems. *Journal of Computational Physics*, 416 :109477, 2020.
- [11] V. Denis, M. Jossic, C. Giraud-Audine, B. Chomette, A. Renault, and O. Thomas. Identification of nonlinear modes using phase-locked-loop experimental continuation and normal form. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 106 :430–452, 2018.
- [12] A. Givois, C. Giraud-Audine, J.-F. Deü, and O. Thomas. Experimental analysis of nonlinear resonances in piezoelectric plates with geometric nonlinearities. *Nonlinear Dynamics*, 102 :1451–1462, 2020.
- [13] E. Enferad, C. Giraud-Audine, F. Giraud, M. Amberg, and B. L. Semail. Generating controlled localized stimulations on haptic displays by modal superimposition. *Journal of Sound and Vibration*, 449 :196–213, 2019.
- [14] S. Ghenna, F. Giraud, C. Giraud-Audine, and M. Amberg. Vector control of piezoelectric transducers and ultrasonic actuators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(6) :4880–4888, 2018.
- [15] A. Kaci, C. Giraud-Audine, F. Giraud, M. Amberg, and B. Lemaire-Semail. Closed loop control of vibration field transient : Application to wave focusing. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 167, 2022.