

Contrôle actif de cordes de piano utilisant des transducteurs électromagnétiques

Laboratoire 1 : STMS (Sciences et Technologies de la Musique et du Son), UMR 9912, Ircam Paris, France. <https://www.stms-lab.fr>

Laboratoire 2 : Department of Music, Miami University, Oxford, Ohio, US. <https://miamioh.edu/cca/departments/music/index.html>

Laboratoire 3 : Institut des Transformations Numériques, Centre de robotique, Mines Paris – PSL.

<https://www.minesparis.psl.eu/blog/actualites/mines-paris-psl-au-coeur-des-transformations-numeriques/>

Domaines scientifiques : Sciences Mécaniques, Acoustique, Electronique et Robotique (ED SMAER).

Directeur de thèse : David Roze (STMS-UMR9912). Rôle : Modélisation des systèmes non linéaires, Systèmes Hamiltoniens à Ports.

Co-encadrant 1 : Per Bloland (Department of Music-Miami University). Rôle : création musicale, jouabilité.

Co-encadrante 2 : Brigitte D'Andréa-Novel (Mathématiques et Systèmes, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Mines ParisTech). Rôle : Contrôle actif non linéaire.

Co-encadrant 3 : Henri Boutin (STMS-UMR9912). Rôle : Contrôle actif et acoustique des instruments de musique.

Mot clés :

Contrôle actif, piano, composition contemporaine, transducteurs électromagnétiques, instrument augmenté, systèmes hamiltoniens à port, systèmes dynamiques non linéaires.

Contexte et objectifs :

Ce projet de recherche doctoral vise à créer une solution intelligente pour étendre et contrôler les caractéristiques vibratoires et acoustiques du piano. Son impact sur la facture instrumentale contemporaine, la création et l'interprétation musicales, s'étend au domaine du contrôle non linéaire des structures dynamiques complexes.

Le contrôle actif permet d'attribuer des caractéristiques temporelles et fréquentielles souhaitées aux structures vibrantes. Appliquée aux instruments de musique, cette technique leur permet ainsi de produire et rayonner de nouveaux sons, contrairement aux effets sonores appliqués aux enregistrements, généralement diffusés par des haut-parleurs [1-5].

Cette thèse s'inscrit dans un projet à long terme né de la collaboration en 2005 d'Andrew McPherson (chercheur) et de Per Bloland (compositeur) à Stanford University, qui a mené à la création de l'EMPP (ElectroMagnetically Prepared Piano) [6-8].

Le projet a ensuite été prolongé lors de 2 résidences musicale menées à l'Ircam :

L'une (2013), en collaboration avec Joël Bensoam, a mené à un premier modèle physique de transducteur électromagnétique,

L'autre (2023-2024), en collaboration avec Henri Boutin, a permis de réaliser les premiers essais de contrôle actif sur un grand piano (Steinway D) [9].

Dans ce projet de recherche doctorale, nous souhaitons appliquer le contrôle à un système complexe, composé de cordes de piano couplées entre elles et à la table d'harmonie. Il repose sur une compréhension détaillée des principes du contrôle non linéaire, et sur sa validation par des modèles physiques.

Organisation de la thèse

La thèse commencera par la création d'un transducteur optimisé pour le contrôle actif colocalisé, composé d'une combinaison d'électroaimants et d'aimants permanents servant à la fois de capteur et d'actionneur. Au cours de cette étape, le doctorant modélisera :

- le champ magnétique rayonné par le transducteur ;
- la vibration du système complexe, composé de trois cordes vibrantes couplées, fixées à leurs extrémités par deux chevalets communs, frappées par un même marteau, et placées à proximité de l'électroaimant.

Ce modèle utilisera le formalisme des Systèmes Hamiltoniens à Port (SHP) adapté au caractère multiphysique (mécanique / magnétique / acoustique) du système considéré. Il s'appuiera sur des résultats récemment publiés dans l'équipe S3AM du laboratoire STMS sur la modélisation et la simulation à passivité garantie de la corde vibrante et l'étude des systèmes dynamiques non linéaires [10] et sur les travaux publiés sur les actionneurs électromagnétiques de l'EMPP [7]. Cette étape permettra d'optimiser la position du transducteur et d'estimer les non-linéarités du système.

La seconde étape consistera à identifier des effets sonores présentant un intérêt pour la création musicale contemporaine, qui constitueront les cibles du contrôle actif dans les étapes suivantes. Ce travail reposera sur les résultats préliminaires obtenus lors de la résidence musicale des compositeurs P. Bloland (Miami Uni, Ohio, US) et R. Causton (Univ. of Cambridge, UK), à l'Ircam [2023-24] sur un prototype de piano actif [10]

Lors de la 3^{ème} étape, des lois de contrôle actif non linéaires seront conçues, puis simulées à partir des modèles non linéaires de cordes et de transducteurs obtenus précédemment. Ces travaux, formulés en SHP pour garantir l'équilibre du bilan de puissance, s'appuieront sur des méthodes développées lors de la thèse de M. Wijnand [5].

La quatrième étape, expérimentale, permettra de mettre en place les solutions de contrôle retenues précédemment sur un instrument réel. Pour cela le doctorant disposera d'un piano ½ queue Petrof et du matériel expérimental mis à disposition par l'Ircam, notamment le processeur numérique dSPACE MicroLabBox à faible latence optimisé pour les applications de contrôle actif, et par Miami University, notamment les actionneurs électromagnétiques et une barre de maintien des transducteurs.

Enfin, la dernière étape porte sur la création d'une interface permettant à l'interprète de jouer simultanément sur le piano de manière traditionnelle, avec le clavier, et sur le son rayonné grâce à la solution de contrôle actif. Pour cela, en collaboration avec des compositeurs et interprètes, le doctorant concevra un *mapping* adéquat entre les caractéristiques sonores ciblées par l'interprète et les coefficients du contrôle actif, puis développera une interface ergonomique adapté au geste expressif du l'interprète.

Equipe encadrante pluridisciplinaire

Le nombre élevé de co-encadrants (4) est justifié par le caractère fortement pluridisciplinaire du sujet de thèse, mêlant mécanique, théorie du contrôle, musicologie et jouabilité. En effet, le doctorant sera entouré de nombreux chercheurs, impliqués dans le projet, dont les spécialités s'accordent avec les disciplines abordées :

David Roze (directeur de thèse, HDR, STMS, CNRS) et Joël Bensoam pour la modélisation et la simulation de systèmes non linéaires, **Brigitte D'Andréa-Novel** (co-encadrante, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Mathématiques et Systèmes) et **Henri Boutin** (co-encadrant, STMS, SU) pour le contrôle actif non linéaire. Les étapes d'identification des objectifs sonores pour la création musicale contemporaine et de développement de l'interface entre l'interprète et le piano actif seront supervisées par les compositeurs **Per Boland** (co-encadrant, Miami University, US) et Richard Causton (professeur de composition à l'Université de Cambridge), reconnus internationalement pour leurs travaux récents sur l'ElectroMagnetically Prepared Piano [7].

Références :

- 1- Boutin, H. (2011). *Méthodes de contrôle actif d'instruments de musique. Cas de la lame de xylophone et du violon* (Doctoral dissertation, UPMC-Université Paris 6 Pierre et Marie Curie).
- 2- Meurisse, T. (2014). *Contrôle actif appliqué aux instruments de musique à vent* (Doctoral dissertation, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI).
- 3- Benacchio, S. (2014). *Contrôle actif modal appliqué aux instruments de musique à cordes* (Doctoral dissertation, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI).
- 4- Jossic, M. (2017). *Contrôle actif et non-linéarités géométriques: le cas du gong xiaoluo* (Doctoral dissertation, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6)).
- 5- Wijnand, M. (2021). *Contrôle en temps fini de systèmes vibratoires hybrides couplant équations aux dérivées partielles et équations aux dérivées ordinaires: les cas du tom et du câble pesant* (Doctoral dissertation, Sorbonne Université).
- 6- Boland, P. (2007). The Electromagnetically-prepared Piano and its Compositional Implications. In *ICMC*.
- 7- Boland, P. (2005). The Electromagnetically-Prepared Piano, <https://magneticpiano.com/>
- 8- McPherson, A. (2012). Techniques and circuits for electromagnetic instrument actuation. In *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*.
- 9- Boland, P., Causton, R., & Boutin, H. (2025). Présentation de fin de résidence musicale, Ircam, Paris. <https://ressources.ircam.fr/en/media/0aabfa7bcef8c877c82b>
- 10- Falaize, A., & Roze, D. (2025). Generic passive-guaranteed nonlinear interaction model and structure-preserving spatial discretization procedure with applications in musical acoustics. *Nonlinear Dynamics*, 113(4), 3249-3275.