

**ED SMAER**

## **Sujet de thèses 2014**

**Laboratoires :**

1. Institut Jean Le Rond d'Alembert UMR7190 CNRS
2. STMS Sciences et Technologies de la Musique et du Son UMR9912 CNRS / IRCAM / UPMC / Ministère de la culture

**Établissement de rattachement :** Université Pierre et Marie Curie

**Directeur de thèse et section CNU ou CNRS :**

Christophe JOSSERAND, Directeur de Recherche CNRS Section 10

**Codirection et section CNU et CNRS :**

Baptiste CHOMETTE, Maître de Conférences CNU60

Adrien MAMOU-MANI, Chercheur IRCAM

David ROZE, Chercheur CNRS IRCAM Section 9

**Titre de la thèse : Contrôle non linéaire d'instruments à percussion en grands déplacements.**

**Collaborations dans le cadre de la thèse :** OUI (d'Alembert / STMS)

**Rattachement à un programme :** NON

**Le sujet peut être publié sur le site web de l'ED SMAER :** OUI ~~NON~~

### **Résumé du sujet :**

Le contrôle actif, initialement développé pour réduire les vibrations sur les structures, est utilisé depuis quelques années pour modifier le comportement vibratoire d'instruments de musique. La méthode dite de « contrôle actif modal » a été appliquée avec succès aux tables d'harmonie d'instruments à cordes et aux résonateurs d'instruments à vent. Cette approche n'a pas encore été utilisée sur les instruments à percussion. Dans le cas particulier des gongs et des cymbales, les grands déplacements de ces instruments génèrent des comportements vibratoires non linéaires (non-linéarité de type géométrique) de l'instrument, qui influent fortement sur leur son. Le projet de thèse proposé a pour objectif de modifier les propriétés vibratoires de cymbales grâce à une extension du contrôle actif modal aux cas faiblement non linéaires. La première phase de l'étude a pour objectif de concevoir un observateur d'état non linéaire à partir de modèles de la vibration non linéaire d'une cymbale, permettant l'estimation du vecteur d'état en temps réel. La simulation de l'application du contrôleur et de ses effets, notamment en terme de synthèse sonore, seront ensuite étudiés avant l'implémentation expérimentale du contrôleur sur une cymbale. Les effets du contrôleur seront finalement interprétés à l'aide de tests psychoacoustiques permettant d'associer la variation des paramètres non linéaires induite par le contrôle à une interprétation musicale en termes de jeu et de palette sonore.

## Sujet détaillé :



Figure 1: Grands déplacements lors du choc d'une cymbale

### Contexte

Initialement développé pour réduire les vibrations et l'endommagement des structures embarquées [1,2], le contrôle actif modal est une méthode de contrôle efficace sur les systèmes linéaires. La particularité de ce type de contrôle est d'agir sur le vecteur d'état du système, projeté dans la base modale. Cette approche permet en particulier de limiter le nombre d'actionneurs et de capteurs nécessaires au contrôle, en agissant sur chaque déformée modale. Elle permet également de réduire l'énergie nécessaire en ciblant les modes à contrôler. La mise en place d'une telle stratégie nécessite une phase d'identification des paramètres modaux afin de concevoir un observateur d'état permettant l'estimation de l'état modal du système en temps-réel à partir d'un modèle d'état linéaire de la structure. La commande du système bouclé agit alors directement sur l'état modal du système. Il est ainsi possible de contrôler les fréquences et les amortissements d'un ou plusieurs modes de vibration, sous l'hypothèse de linéarité.

Depuis quelques années, le contrôle actif est utilisé pour modifier le son et le timbre des instruments de musique [3]. L'approche modale a été appliquée récemment aux instruments de musique à cordes [4,5] et à vent [6] (projet ANR IMAREV). Les tables d'harmonie et les résonateurs d'instruments à vent ayant un comportement généralement linéaire, ils peuvent être modélisés par un modèle d'état linéaire. Le contrôle actif modal est donc particulièrement pertinent dans ces cas. Un démonstrateur expérimental, permettant un prototypage rapide basé un système linux temps-réel (Xenomai) à latence très faible, a été réalisé à l'UMR STMS (Ircam/UPMC/CNRS) en collaboration avec l'Institut d'Alembert (UPMC/CNRS). Il est actuellement utilisé pour étudier les effets sonores et perceptifs des modifications des fréquences et amortissements modaux pour une guitare, un violoncelle et une clarinette basse.

On trouve aussi de nombreux comportements non linéaires dans les instruments de musique. Ces comportements ne sont pas contrôlables avec un contrôle actif modal intégrant un observateur d'état linéaire. Prenons l'exemple de certaines percussions comme les cymbales

(voir Figures 1 et 2) ou encore certains gongs. Lorsqu'ils sont sollicités à faible amplitude, ces instruments vibrent linéairement, sur leurs modes de vibration [7,8]. A plus forte sollicitation, des fréquences non-modales apparaissent et le timbre change. Enfin, à très forte sollicitation, un spectre large bande se déploie, n'ayant plus rien à voir avec les modes de vibration du système linéaire.

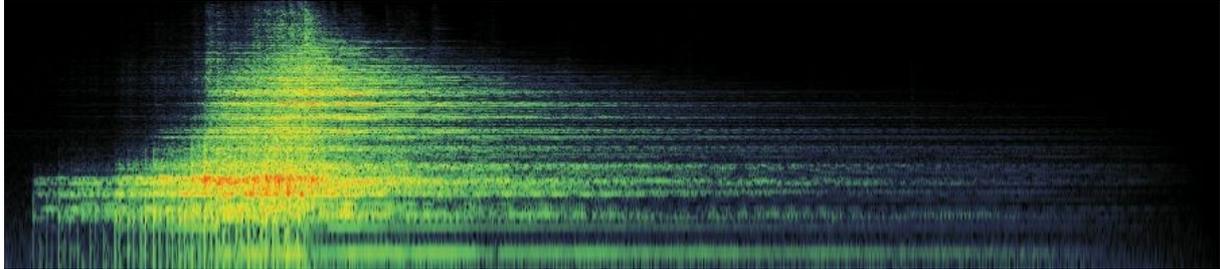


Figure 2 : Spectrogramme d'un son de cymbale avec excitation répétée

Ces comportements non linéaires ont été particulièrement étudiés depuis une dizaine d'années. Leur prise en compte a permis d'obtenir des sons de synthèse très réalistes. Ils sont dus aux grands déplacements et grandes rotations des instruments, impliquant de la non-linéarité de type géométrique. Selon son degré, cette non-linéarité géométrique sera prise en compte de différentes manières. Dans les cas faiblement non linéaires, des méthodes de perturbation autour de l'état linéaire résolvent le problème.

Plusieurs approches ont ainsi été utilisées sur des instruments de musique avec faible non-linéarité géométrique. Par exemple, les séries de Volterra permettent de représenter des systèmes faiblement non linéaires par leurs noyaux de Volterra [9]. Ces noyaux, une fois connus, permettent d'approximer la réponse d'un système comportant une non-linéarité polynomiale. La représentation sous forme de vecteur d'état de cette relation permet de créer une structure de simulation pour les premiers noyaux basée sur des filtres ainsi que des sommes et produits instantanés [10]. La sortie de chaque banc de filtre fournit la réponse de l'ordre de non-linéarité correspondant.

## Objectifs

Le sujet de thèse a pour objectif de relier les domaines du contrôle actif d'instruments de musique et celui de la modélisation des systèmes avec non-linéarité géométrique, en étendant le contrôle actif modal au cas faiblement non linéaire. Le/la doctorant(e) sera chargé(e) d'évaluer la pertinence des différentes approches en modélisation de systèmes non linéaires pour le cas du contrôle des cymbales. Il/elle devra enrichir les méthodes d'identification modale, en y incluant l'identification des paramètres non linéaires. Il faudra alors intégrer ces résultats dans un observateur d'état et le contrôleur modal sera étendu pour contrôler la non-linéarité de la vibration.

Une fois le contrôleur conçu, il sera validé en simulation en comparant les sons obtenus avant et après contrôle. Un positionnement optimal des capteurs et actionneurs sera alors effectué. Le contrôle expérimental sera tout d'abord étudié dans le cas d'une excitation sinusoïdale, en terme de distorsion harmonique et d'inflexion de la résonance (raidissement ou

assouplissement dû à la non-linéarité géométrique [7,8]. Enfin, une approche qualitative du son rayonné dans le cas d'oscillations libres sera choisie.

## Résultats attendus

La modélisation adoptée des non-linéarités géométriques doit permettre la conception d'un observateur robuste et non linéaire (à partir, par exemple, des séries de Volterra) permettant la reconstruction de la dynamique de l'instrument dans le cas d'un comportement non linéaire. Le contrôle non linéaire doit finalement permettre de modifier de façon perceptible le son de l'instrument au niveau du timbre et de la palette sonore.

## Bibliographie

1. B. Chomette, D. Rémond, S. Chesné, L. Gaudiller, Semi-adaptive modal control of on-board electronic boards using identification method, *Smart Material and Structures*, 2008, vol 17, 8p.
2. B. Chomette, A. Fernandes and J-J. Sinou, Cracks detection using active modal damping and piezoelectric components, *Shock and Vibration*, in press, 2013, 1-13.
3. H. Boutin, "Méthodes de contrôle actif d'instruments de musiques acoustiques", Phd thesis, Université Pierre et Marie Curie (2011).
4. S. Benacchio, A. Mamou-Mani, B. Chomette and F. Ollivier, Modal active control applied to simplified string musical instruments, *International Congress on Acoustics*, June 2013, Montreal (Canada).
5. S. Benacchio, B. Chomette, A. Mamou-Mani and F. Ollivier, Simulated effects of combined control applied on an experimentaly identified soudboard, *SMAC 2013, SMC Sound and Music Computing Conference 2013*, August 2013, Stockholm (Sweden).
6. T. Meurisse, A. Mamou-Mani, R. Caussé and D. Sharp, Active control applied to wind instruments, *Acoustics 2012*, April 2012, Nantes (France).
7. C. Touzé, *Vibrations non linéaires géométriques de structures minces*, HDR, ENSTA, 2009.
8. O. Thomas, *Analyses et modélisation de vibrations non linéaires de milieux élastiques minces- application aux instruments à percussion*, Doctorat UPMC, 2001
9. D. Bard, *Compensation des non-linéarités des systèmes haut-parleurs à pavillon*, thèse de Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005.
10. T. Hélie, D. Roze, Sound synthesis of a nonlinear string using Volterra series, *Journal of Sound and Vibration*, Mars 2008, vol. 314, p. 275-306.