

## Réglage Expérimental des Paramètres Modaux de Table d'Harmonie d'Instruments à Cordes par Contrôle Actif Modal

S. Benacchio<sup>a</sup>, A. Mamou-Mani<sup>a</sup>, B. Chomette<sup>b</sup> et V. Finel<sup>c</sup>

<sup>a</sup>STMS Ircam-CNRS-UPMC, 1 place Stravinsky, 75004 Paris, France

<sup>b</sup>Institut d'Alembert, UMR CNRS 7190, UPMC Univ Paris 06, 4 place Jussieu, F-75005 Paris, France

<sup>c</sup>UPMC 06, Institut Jean Le Rond d'Alembert, CNRS, UMR 7190, 4 place Jussieu, F-75005 Paris, France

benacchio@ircam.fr

Dans le domaine de l'acoustique musicale, le lien entre les caractéristiques des instruments et le son qu'ils produisent a toujours été une préoccupation majeure. Pour la plupart des familles d'instruments et notamment pour celle des instruments à cordes, de nombreuses études traitent de ce sujet. Le rôle de la table d'harmonie a dans ce cas été révélé comme extrêmement important. Les paramètres modaux de ces structures vibrantes se sont avérés particulièrement intéressants pour tenter de relier propriétés vibratoires et qualités de ces instruments. Cette étude propose une méthode permettant de réaliser des modifications de paramètres modaux expérimentalement sur des tables d'harmonie d'instruments à cordes par contrôle actif. Ceci est réalisable grâce à une méthode de contrôle actif modal utilisant une mesure de la vibration de la table d'harmonie. Un système de contrôle construit dans l'espace d'état projeté sur base modale rend possible des modifications subtiles des paramètres modaux de la structure contrôlée en y réinjectant un signal de commande à l'aide d'actionneurs. Ainsi les effets acoustiques de ces modifications modales peuvent être étudiés directement en mesurant le son rayonné par l'instrument.

## 1 Introduction

De sa fabrication à son utilisation par un musicien, de nombreux paramètres impactent le son que peut produire un instrument de musique. Dans le domaine de l'acoustique musicale, l'une des préoccupations majeures est de déterminer quels paramètres vibratoires expliquent les différences de timbre entre instruments d'une même famille. De nombreux outils ont été développés afin de tenter de répondre à cette question. Des modèles analytiques sont sans cesse améliorés afin de comprendre et de représenter au mieux les différents phénomènes impliqués dans la production du son d'un instrument. Fletcher et Rossing [1] proposent par exemple des modèles analytiques d'instruments de musique pour en comprendre la physique. Dans le cas particulier des instruments à cordes, Gough [2, 3] étudie le couplage entre la corde et la table d'harmonie du violon et tente de comprendre le phénomène de note du loup. D'autres méthodes, utilisant des ressources plus récentes, ont aussi été développées. Richardson et Roberts [4] utilisent des méthodes d'interférométrie holographique et d'analyse par éléments finis afin de comprendre le rôle des fréquences modales de table d'harmonie de guitare. Woodhouse [5, 6] propose une méthode de synthèse permettant d'étudier la qualité du son des instruments à cordes. Toutes ces études concluent que les paramètres modaux des différentes parties vibrantes de l'instrument sont des bons descripteurs de la qualité du son d'un instrument. Wright [7] donne, grâce à des tests d'écoute, le lien entre les paramètres modaux de tables d'harmonie de guitares et des termes de qualité sonore tels que brillance, intensité ou encore homogénéité de l'instrument. Cependant il est très difficile d'étudier l'influence des paramètres modaux d'instruments de musique *in situ*. Jansson [8] traite cette question en comparant l'admittance au chevalet de 25 violons pour en dégager des caractéristiques donnant des indices sur la qualité des instruments.

Depuis quelques dizaines d'années, une nouvelle technologie est utilisée en acoustique musicale pour modifier le son des instruments. Le contrôle actif permet de modifier les vibrations d'une structure ou d'une colonne d'air à l'aide de capteurs, d'actionneurs et d'un dispositif de contrôle numérique. En contrôlant la phase et l'amplitude du déplacement mesuré sur une lame de xylophone, Besnainou [9] et Boutin [10] parviennent à en modifier le son. Berdahl [11] étudie quant à lui l'effet d'un amortissement actif appliqué aux modes d'une corde vibrante. La méthode dite de contrôle actif modal dans l'espace d'état s'est révélée particulièrement adaptée aux instruments de musique puisqu'elle permet d'agir directement sur les paramètres

modaux de ces derniers. Son principal avantage est de concentrer l'énergie du système de contrôle sur les modes choisis et ce, grâce à un nombre minimal de transducteurs. Hanagud [12] utilise cette méthode pour modifier les fréquences et les amortissements modaux des trois premiers modes d'une table d'harmonie de guitare. Cependant, l'influence du contrôle modal sur le son des instruments n'a jamais été étudié.

Cette étude propose donc de démontrer qu'il est désormais possible d'étudier, *in situ*, l'influence des paramètres modaux des tables d'harmonie d'instruments sur le son qu'ils produisent. Le contrôle actif modal est présenté dans une première partie et est ensuite appliqué à une table d'harmonie simplifiée. Un système de contrôle permet ensuite de réaliser des modifications sur les modes de cette structure. Le son rayonné par cet instrument est étudié dans une dernière partie.

## 2 Méthode de Contrôle

### 2.1 Contrôle Actif Modal

Le contrôle actif modal est une méthode utilisant un modèle d'état de la structure à contrôler. Puisque ce contrôle est modal, l'état du modèle est un vecteur contenant le déplacement modal et la vitesse modale de la structure. L'état dérivé est par conséquent un vecteur contenant la vitesse modale et l'accélération modale de la structure. Le vecteur d'état est nécessaire pour calculer en chaque instant le signal de commande qu'il faut imposer à la structure pour atteindre le contrôle souhaité. Dans notre cas, la cible du contrôle correspond à de nouvelles valeurs de paramètres modaux tels que les fréquences ou les amortissements modaux. Le signal de commande est appliqué à la structure grâce à un actionneur.

L'état modal d'un système n'est cependant pas directement mesurable à l'aide d'un capteur. Un observateur d'état utilisant le modèle de la structure permet d'en donner un état estimé. Le principe général du contrôle actif modal est représenté sur la Figure 1(b).

### 2.2 Modélisation de la Structure

La dynamique d'un système linéaire contrôlé et soumis à une perturbation s'écrit dans l'espace d'état

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{G}w(t) \\ y(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{cases}, \quad (1)$$

où  $\mathbf{x}^t(t) = [\mathbf{q}^t(t) \dot{\mathbf{q}}^t(t)]$  est le vecteur d'état. Les grandeurs  $u(t)$ ,  $y(t)$  et  $w(t)$  sont respectivement les signaux de commande, de mesure et de perturbation.  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  et  $\mathbf{G}$  sont les matrices de la dynamique de la structure, de l'actionneur, du capteur et de la perturbation. Pour un système de  $n$  modes, possédant un capteur et un actionneur, ces matrices d'états peuvent s'écrire

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n,n} & \mathbf{Id}_{n,n} \\ -\Omega^2 & -2\Xi\Omega \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n,1} \\ \Pi^a \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n,1} \\ \Pi^w \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \Pi^c \\ \mathbf{0}_{n,1} \end{bmatrix}^t, \quad (3)$$

avec  $\Omega = \text{diag}(\omega_\ell)$  et  $\Xi = \text{diag}(\xi_\ell)$ .  $\omega_\ell$  et  $\xi_\ell$  sont respectivement la fréquence et l'amortissement modal du  $\ell^{\text{ème}}$  mode.  $\Pi^a$ ,  $\Pi^c$  et  $\Pi^w$  sont respectivement les vecteurs actionneur, capteur et de perturbation.

### 2.3 Contrôleur et Observateur

Le vecteur des gains de contrôle  $\mathbf{K}$  permettant d'atteindre le contrôle souhaité est donné grâce à un placement de pôle. Le signal de commande  $u(t)$  est calculé grâce au vecteur d'état contenant les déplacements modaux et vitesses modales de la structure.

$$u(t) = -\mathbf{K}\mathbf{x}(t). \quad (4)$$

Dans le cas d'un contrôle de l'état dérivé, le signal de commande est calculé grâce aux vitesses et accélérations modales.

$$u(t) = -\mathbf{K}\dot{\mathbf{x}}(t). \quad (5)$$

Pour obtenir l'état du système, un observateur de Luenberger est utilisé. Son vecteur gain  $\mathbf{L}$  est également calculé grâce à un placement de pôle. Dans la suite, l'état dérivé est utilisé pour le contrôle.

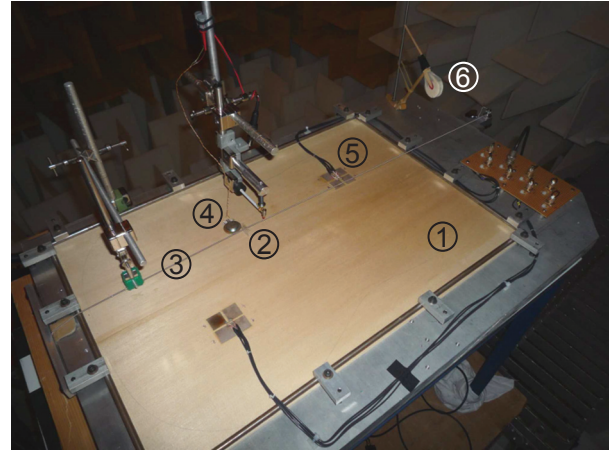
## 3 Validation Expérimentale

### 3.1 Montage Expérimental

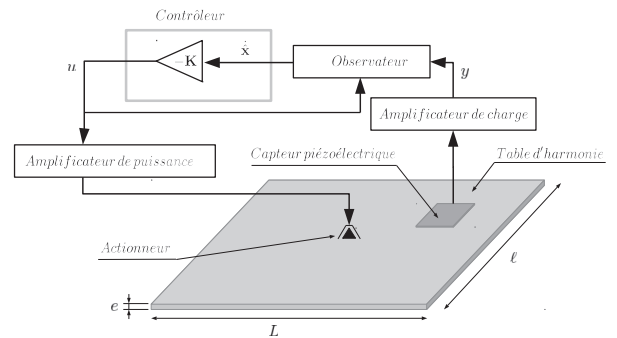
Une structure simplifiée permet de valider expérimentalement l'utilisation du contrôle modal pour étudier l'influence des paramètres modaux sur le son d'un instrument. On s'intéresse ici à une table d'harmonie en épicea, rectangulaire et encastrée à ses extrémités. Ses dimensions, données sur la Figure 1 sont définies par  $L = 6.10^{-1} m$ ,  $\ell = 4.10^{-1} m$  et  $e = 4.10^{-3} m$ . Le signal de commande du système de contrôle est envoyé sur cette plaque grâce à un actionneur électrodynamique de type HIAX13C02-8/RH. La vibration de la plaque est mesurée grâce à un patch piézoélectrique PZT-5H. Le signal de perturbation provient d'une corde frappée dont la vibration est transmise par l'intermédiaire d'un chevalet. Cette corde est excitée à l'aide d'un marteau de piano fixé sur le bâti. Les détails du montage expérimental sont donnés sur la Figure 1(a).

### 3.2 Réalisation du Système de Contrôle

Pour cette étude, la bande de fréquence contrôlée ne dépasse pas 1 KHz. Pour une utilisation classique en contrôle actif, la fréquence d'échantillonnage du système



(a) Mesure en chambre anéchoïque (① Table d'harmonie simplifiée, ② Chevalet, ③ Corde, ④ Actionneur, ⑤ Capteur, ⑥ Marteau de piano).



(b) Montage expérimental lié au système de contrôle.

FIGURE 1 – Montage expérimental.

de contrôle doit être au moins 10 fois supérieure à la plus haute fréquence contrôlée. Cependant, l'oreille humaine est capable d'entendre des sons jusqu'à 20 KHz. La fréquence d'échantillonnage du système de contrôle doit donc être au moins supérieure à cette limite. Si cette condition n'est pas respectée, le signal de commande introduira un bruit parasite dû à son échantillonnage. Pour atteindre cette fréquence, l'environnement temps réel Xenomai est utilisé [13]. Ainsi il est possible de travailler à des fréquences basses tout en ayant une fréquence d'échantillonnage avoisinant les 20 KHz.

Pour obtenir le modèle d'état ( $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$ ) utilisé par le système de contrôle, il est nécessaire de connaître les fréquences et les amortissements des modes de la structure. Il est également nécessaire de connaître les propriétés électromécaniques des transducteurs utilisés pour mesurer et envoyer les signaux. Chesne [14] propose une méthode d'identification basée sur l'algorithme Rational Fraction Polynomial permettant d'obtenir ces paramètres. Cette méthode a l'avantage de n'utiliser qu'une seule fonction de réponse en fréquence (FRF) entre l'actionneur et le capteur du système de contrôle. Il n'est donc pas utile d'avoir un autre dispositif de mesure pour obtenir les propriétés recherchées. Une fois le modèle d'état identifié à l'aide de cette méthode, il est directement implémenté dans le système de contrôle numérique.

## 4 Modification du Son Rayonné par la Table d'Harmonie

Dans cette partie, le contrôle d'état dérivé est utilisé pour modifier le son rayonné de la table d'harmonie simplifiée. Les FRFs de la table d'harmonie servant à observer l'effet du contrôle sur les modes de la structure sont réalisées en envoyant un balayage sinus grâce à l'actionneur servant pour le contrôle. Les sons étudiés sont mesurés lorsque la table d'harmonie est excitée par la corde frappée par le marteau de piano. Ce système d'excitation possède l'avantage de donner des résultats répétables. Le son rayonné est mesuré par un microphone de mesure Brüel et Kjaer placé à 1 mètre au dessus de la table d'harmonie.

### 4.1 Cible du Contrôle

Cette étude propose d'illustrer expérimentalement l'effet du couplage d'un partiel de corde avec des modes de table. D'après Gough [3], dans le cas d'un couplage faible, l'amortissement du partiel de corde est plus important que dans le cas d'un partiel non couplé. La fréquence fondamentale de la corde est fixée à 110 Hz plaçant ainsi la fréquence de son troisième partiel entre celles des modes 9 et 10 de la table d'harmonie. Le contrôle proposé est donc ciblé sur ces modes marqués par des numéros sur la Figure 2. Ils sont tous deux déplacés en fréquence, le premier de -2.5 % et le second de +2.5 %. L'effet de ce contrôle sur la FRF de la table d'harmonie est présenté sur la Figure 2. On observe que le contrôle décale effectivement

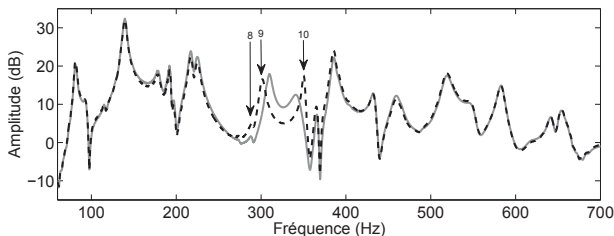


FIGURE 2 – FRF expérimentale de la table d'harmonie simplifiée non contrôlée (—) et contrôlée (---). Mode 9 : -2.5 % en fréquence. Mode 10 : +2.5 % en fréquence.

les modes 9 et 10 de la valeur attendue. On note également que l'amortissement de ces deux modes est modifié. Cela est dû à plusieurs raisons. La première est que, sans contrôle, ces deux modes sont assez proches en fréquence et sont par conséquent légèrement couplés. Ils ont donc un effet l'un sur l'autre et changent d'amortissement lorsqu'ils sont éloignés grâce au contrôle. La seconde raison vient du contrôle lui-même. En effet, le schéma de discrétisation utilisé pour convertir le modèle de la structure introduit des erreurs numériques dans le calcul de la commande. Une solution dans ce cas est d'utiliser un système plus rapide. Il est également possible de compenser ces deux phénomènes en contrôlant l'amortissement des modes 9 et 10. Dans notre cas aucune de ces deux solutions n'est appliquée. Une autre remarque concerne le mode 8 également marqué par un numéro sur la Figure 2. On constate que ce mode est très près du mode 9 et que le décalage en fréquence de ce dernier entraîne une augmentation d'amplitude du mode 8.

### 4.2 Effets du Contrôle sur le Son Rayonné

L'effet du contrôle peut ensuite être observé dans le son rayonné par la table d'harmonie. Les Figures 3 et 4 en donnent les transformées de Fourier lorsque la table d'harmonie est non contrôlée et contrôlée. Dans chacun de ces cas, deux mesures sont superposées. Leur coincidence démontre une très bonne répétabilité des mesures due à l'utilisation du marteau de piano. Ces figures montrent que

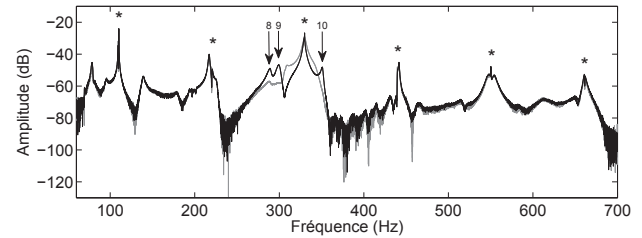


FIGURE 3 – Transformée de Fourier du son rayonné par la table d'harmonie non contrôlée (—) et contrôlée (---). ★ Partiels de corde.

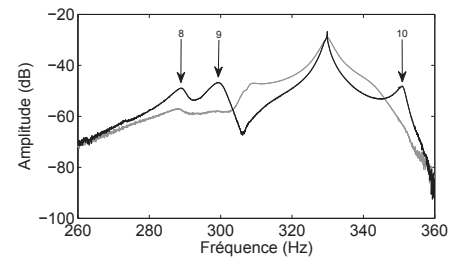


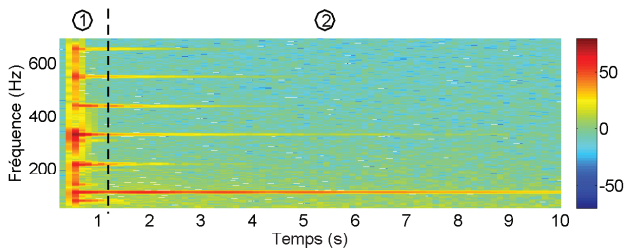
FIGURE 4 – Zoom sur la bande de fréquence modifiée de la transformée de Fourier du son rayonné par la table d'harmonie non contrôlée (—) et contrôlée (---).

le contrôle a aussi un effet sur le son rayonné. En effet, le décalage en fréquence des modes 9 et 10 y est visible. Ces deux modes sont marqués par des numéros sur les Figures 3 et 4. De plus, l'effet du décalage en fréquence du mode 9 sur le mode 8 est également visible dans le son rayonné. L'augmentation en amplitude y est plus importante. En effet, alors que la différence d'amplitude entre ces deux modes était de plusieurs décibels sur la Figure 2, elle est quasiment nulle dans le son rayonné.

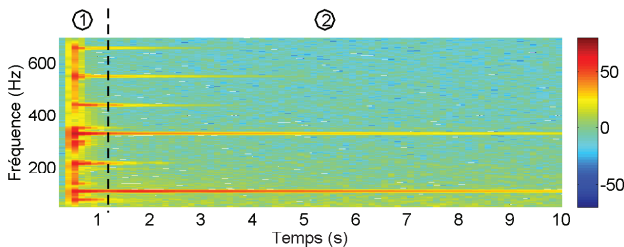
Les pics les plus hauts marqués par des étoiles sur la Figure 3, correspondent aux partiels de la corde. Ils sont quasiment harmoniques et imposent la hauteur du son de l'instrument. Le système de contrôle ne peut pas contrôler directement ces partiels car ils ne sont pas pris en compte dans le modèle. Il n'est donc pas possible de contrôler la fréquence de ces pics. Cependant, d'autres propriétés de ces partiels peuvent être modifiées grâce au contrôle des modes de vibration de la table d'harmonie. La Figure 4 montre que d'éloigner les modes 9 et 10 de la fréquence du troisième partiel de corde a un effet sur l'amortissement de ce dernier.

Pour confirmer cette modification, l'évolution temporelle du son est étudié lorsque la table d'harmonie est non contrôlée et contrôlée. La Figure 5 présente les spectrogrammes des sons mesurés dans ces deux cas. Aux vues de ces spectrogrammes, il est possible de diviser le son en deux parties marquées par ① et ② sur la Figure 5. La première





(a) Son rayonné par la table d'harmonie non contrôlée.



(b) Son rayonné par la table d'harmonie contrôlée.

FIGURE 5 – Spectrogrammes du son rayonné par la table d'harmonie non contrôlée et contrôlée.

partie a une durée d'environ 1 seconde pendant laquelle de nombreuses fréquences sont générées. Elle correspond à la combinaison entre le signal de corde et la réponse de la table d'harmonie. Le contrôle de la table d'harmonie peut être observé dans cette partie puisque le décalage en fréquence des modes 9 et 10 est visible. En effet, les deux pics combinés au troisième partiel de corde sur la Figure 5(a) sont séparés sur la Figure 5(b). L'augmentation en amplitude du mode 8 est également observable. Cette première partie du son est donc clairement modifiée par le contrôle de la table d'harmonie. La seconde partie du son correspond à la décroissance du signal de corde. Dans cette partie, les fréquences restantes correspondent aux partiels de corde. Sur la Figure 5(b), l'amortissement du troisième partiel de corde a clairement diminué par rapport à celui de la Figure 5(a). Pour illustrer ce phénomène, la Figure 6 donne l'amplitude de ce partiel au cours du temps dans les deux cas étudiés. Cette figure démontre que l'amortissement

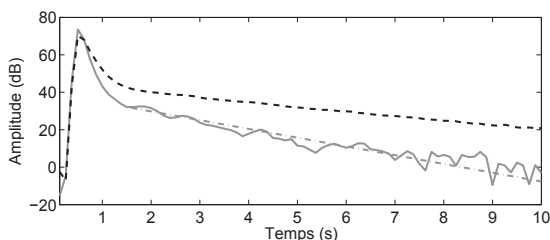


FIGURE 6 – Evolution temporelle de l'amplitude du troisième partiel de corde lorsque la table d'harmonie est non contrôlée (—) et contrôlée (---). La droite grise pointillée (· · ·) représente une moyenne approximative de la décroissance du partiel lorsque la table d'harmonie n'est pas contrôlée.

du troisième partiel de corde est modifié puisque la pente de la courbe est moins importante lorsque la table d'harmonie est contrôlée. Ce phénomène correspond à l'effet obtenu par un découplage du partiel de corde et des modes de table

dans le cas d'un couplage initial faible. Le quatrième partiel de corde est légèrement modifié par le contrôle de la table d'harmonie. Cela est dû au fait que le contrôle des modes 9 et 10 de la table a un léger impact sur les modes supérieurs comme le montre la Figure 2. Cependant, ces effets sont faibles.

Il est finalement possible d'écouter les enregistrements<sup>1</sup> des sons rayonnés. L'effet du contrôle est clairement perceptible dans ces sons. La modification d'amortissement du troisième partiel de corde est particulièrement notable. En effet, après environ 4 secondes, les seuls partiels que l'on peut encore entendre dans le son contrôlé sont la fondamentale et la quinte. Une écoute plus attentive de la première partie du son est nécessaire pour entendre les modifications du son. Cela est dû au fait que beaucoup plus de fréquences sont présentes durant cette partie.

## 5 Conclusion

Cet article propose de démontrer que l'influence des paramètres modaux des tables d'harmonie d'instruments à cordes peut être étudiée *in situ*. Grâce à l'utilisation du contrôle actif, l'importance de ces paramètres sur le son rayonné peut être révélée expérimentalement. La méthode de contrôle actif modal de l'état dérivé se révèle particulièrement adaptée dans ce cas puisqu'elle permet de cibler le contrôle sur les modes souhaités et ce à l'aide d'un nombre minimal de transducteurs. Un instrument à cordes simplifié est utilisé afin de démontrer expérimentalement l'efficacité de ce type de contrôle. Un exemple de modification du son rayonné par la table d'harmonie de cet instrument est étudié. Ces résultats comparés avec ceux d'études utilisant des outils analytiques ou numériques peuvent permettre d'en illustrer expérimentalement les conclusions.

## Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre de la thèse de Simon Benacchio, financée par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR projet IMAREV). Les auteurs aimeraient remercier René Caussé et Robert Piéchaud pour leur précieuse aide.

1. <http://instrum.ircam.fr/control-effects/>

## Références

- [1] N. H. Fletcher and T. D. Rossing, *The Physics of Musical Instruments*, Springer-Verlag, (1991)
- [2] C. E. Gough, *The Resonant Response of a Violin G-string and the Excitation of the Wolf-Note*, Acta Acustica united with Acustica, **44**, (1980)
- [3] C. E. Gough, *The Theory of String Resonances on Musical Instruments*, Acta Acustica united with Acustica, **49, 2**, 124-141, (1981)
- [4] B. E. Richardson and G. W. Roberts, *The Adjustment of Mode Frequencies in Guitars : A Study by Means of Holographic Interferometry and Finite Element Analysis*, Proceedings of SMAC, (1983)
- [5] J. Woodhouse, *On the Synthesis of Guitar Plucks*, Acta Acustica united with Acustica, **90, 5**, 928-944 (2004)
- [6] J. Woodhouse, *Plucked Guitar Transients : Comparison of Measurements and Synthesis*, Acta Acustica united with Acustica, **90, 5**, 945-965 (2004)
- [7] H. Wright, *The Acoustics and Psychoacoustics of the Guitar*, PhD Thesis, University of Wales, College of Cardiff, (1996)
- [8] E. V. Jansson, *Admittance Measurements of 25 High Quality Violins*, Acta Acustica united with Acustica, **83**, 337-341 (1997)
- [9] C. Besnainou *Modal Stimulation : A Sound Synthesis New Approach*, Proceedings of ISMA, (1995)
- [10] H. Boutin *Méthodes de contrôle actif d'instruments de musiques acoustiques*, PhD Thesis, Université Pierre et Marie Curie, (2011)
- [11] E. Berdahl and J. O. Smith III, *Active Damping of Vibrating String*, 6th International Symposium on Active Noise and Vibration Control, (2006)
- [12] S. Hanagud and S. Griffin, *Active Structural Control for a Smart Guitar*, Smart Materials and Structures : Proceedings of the Fourth European and Second MIMR Conference, (1998)
- [13] S. Benacchio, R. Piéchaud, A. Mamou-Mani, B. Chomette and V. Finel *Active Control of String Instruments using Xenomai*, Proceedings of the 15th Real-Time Linux Workshop, (2013)
- [14] S. Chesne, C. Jean-Mistral and L. Gaudiller, *Experimental identification of smart material coupling effects in composite structures*, Smart Materials and Structures, **22, 7**, 1-10, (2013)