

# Modélisation passive 4D de plaques vibrantes auto-entretenues en grandes déformations : applications musicales aux structures Baschet et diffuseurs d'ondes Martenot

- Laboratoire 1 : STMS (Sciences et Technologies de la Musique et du Son, UMR9912)
- Laboratoire 2 : CRC (Centre de Recherche sur la Conservation, USR 3224)

Domaine scientifique : Sciences Mécaniques, Acoustique, Électronique et Robotique (ED SMAER)

Directeur de thèse : Thomas Hélie (STMS-UMR9912). Rôle : Système Hamiltoniens à Ports [1]

Co-encadrante 1 : Marguerite Jossic (CRC-USR 3224). Rôle : Mesures physiques [2, 3]

Co-encadrante 2 : Emmanuelle Rouhaud (GAMMA3, UTT). Rôle : Formulation espace-temps (4D) [4, 5]

Mots-clés : Cristal Baschet, diffuseurs Martenot, synthèse sonore et instruments virtuels, plaques et coques, vibrations en grandes déformations, systèmes hamiltoniens à ports.

Ce projet s'insère dans l'axe "L'instrument d'hier au service de celui de demain" du Collegium Musicae.

## 1 Contexte, objectifs, approche

Contexte : Les vibrations de plaques et de coques sont impliquées dans de nombreux instruments de musique [6]. Lorsque ces vibrations mettent en jeu de grandes déformations, les sonorités produites s'enrichissent significativement. Les très grandes déformations peuvent aller jusqu'à provoquer des changements de régimes (apparition de sous-harmoniques, résonances internes [2] entendues comme des multiphoniques, voire transition vers le chaos [7] et phénomènes dits de turbulences d'ondes comme pour la plaque tonnerre). Cette richesse sonore et cette complexité est encore accrue dans le cas où les objets ne sont pas excités par des impulsions suivies de régime libre (cas frappé ou pincé par exemple) mais sous forme auto-entretenu (archet ou excitation par frottement, actionneur électro-mécanique, etc.). Plusieurs travaux sur la synthèse sonore par modélisation physique de tels objets montrent l'intérêt d'être particulièrement attentif aux propriétés énergétiques, même dans le cas d'excitations simples [7, 8]. Dans cette thèse, on étudiera le cas de plaques et coques pour deux types d'objets musicaux :

- les structures Baschet excitées ou bien par frottement, ou bien par de nouveaux modes de jeu provoquant des régimes auto-entretenus [9, 10],
- un diffuseur d'ondes Martenot : le diffuseur métallique [11].

Objectifs : L'objectif scientifique est de fournir des modèles et **moteurs de synthèse sonore** à physique réaliste, capables d'être joués en temps réel et d'être utilisés pour **reproduire, prédire, modifier les comportements**, et proposer de **nouveaux modes de jeu**. L'objectif musical est multiple : comprendre les modes de fonctionnements de ces instruments de musique du XXe siècle, les modéliser, simuler et **extrapoler** pour déboucher sur l'avènement de **nouvelles sources sonores musicales**.

Approche : Ce réalisme reposera d'une part sur les garanties scientifiques (physique et simulation numérique passive, modèles raffinés d'amortissement, représentation de non-linéarités mécaniques exclusivement essentielles par opposition aux non-linéarités due à des choix techniques de représentation), apportées par le formalisme espace-temps (4D) et les Systèmes Hamiltoniens à Ports (SHP) [1]. Il reposera d'autre part sur la caractérisation des résonateurs étudiés et des modalités de mise en vibration de ces derniers.

## 2 Organisation des travaux

### 2.1 Modélisation et simulation

La modélisation du comportement des plaques en grande déformation est un problème hautement non linéaire pour des raisons principalement géométriques (mais aussi de lois des matériaux). Depuis les travaux pionniers de Sophie Germain en 1821, de nombreuses questions restent encore ouvertes à ce sujet, dont plusieurs doivent être résolues pour une synthèse sonore réaliste et de qualité. On se propose d'adapter une formulation intrinsèque relativiste (indépendante des choix de coordonnées et de l'observateur) et qui garantit un bilan de puissance :

1. On formulera les structures vibrantes en s'appuyant sur des descriptions géométriques espace-temps [12], dites objectives (invariance par changements d'observateurs) [5], non satisfaites par de nombreux modèles standard et que l'on sait pourtant être essentielles quand il s'agit de modéliser les grandes déformations [13].
2. On s'intéressera à la prise en compte d'effets thermo-mécaniques ou dissipatifs, d'abord pour des lois physiques connues [4], puis pour des classes généralisées énergétiquement bien posées destinées à élaborer des matériaux mutants à des fins musicales.

3. On permettra l'excitation de ces structures en introduisant des ports d'interaction et exprimera ce système ouvert dans le formalisme des SHP [14] qui garantira le bilan de puissance. Ces ports seront connectés à des sources d'excitation via des lois physiques passives, linéaires ou non, et régulières ou non (contact, frottements, etc.) [15], que l'on choisira en fonction des modes de jeu souhaités.

On concevra des méthodes de discrétisation spatio-temporelle qui préserveront le bilan de puissance et l'invariance par changement d'observateur, avec objectif de synthèse sonore en temps-réel. Pour cela, on explorera plusieurs stratégies à porter en 4D : changement de variables flux/effort en ondes de puissances ou méthodes de réduction d'ordre (éléments finis [16], projection modale ou modes non linéaires [8]) tirant parti des propriétés des matrices creuses. Techniquement, on cherchera à développer des solveurs explicites, itératifs massivement parallélisables, ou à convergence accélérée.

## 2.2 Objets d'études

Deux instruments identifiés dans les collections du Musée de la Musique seront privilégiés pour l'étude : un Cristal Baschet, modèle de concert de 1980 <sup>1</sup>, et un résonateur métallique d'onde Martenot de 1955 <sup>2</sup>. Dès le début de la thèse, des expériences seront mises en place pour la mesure et l'identification des paramètres physiques (géométrie et matériau : acier, inox, fibre de verre, fibre de carbone, etc), d'abord dans le contexte des petites déformations. Dans un second temps, conjointement avec le développement du modèle, on identifiera les paramètres complémentaires en situation de grandes déformations. Sur la base de ces paramètres physiques et géométriques (caractérisant les fonctions d'énergie, lois de dissipations et les pré-contraintes), on produira des fac-similés numériques qui pourront être extrapolés par modification des paramètres. On proposera de nouveaux modes de jeux (à dynamique auto-entretenu) en les couplant à de nouvelles sources d'excitation. En fin de thèse, ces résultats pourraient bénéficier au développement de contrôle actif sur les instruments réels.

## References

- [1] A. Falaize and T. Hélie. Passive simulation of the nonlinear port-hamiltonian modeling of a rhodes piano. *Journal of Sound and Vibration*, 390:289–309, mar 2017.
- [2] M. Jossic, O. Thomas, V. Denis, B. Chomette, and A. Mamou-Mani et al. Effects of internal resonances in the pitch glide of chinese gongs. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1(144):431–442, 2018.
- [3] M. Jossic, A. Mamou-Mani, B. Chomette, D. Roze, F. Ollivier, and C. Josserand. Modal active control of chinese gongs. *Journal of the Acoustical Society of America*, (141):4567–4578, 2017.
- [4] B. Panicaud, E. Rouhaud, G. Altmeyer, M. Wang, R. Kerner, A. Roos, and O. Ameline. Consistent hypo-elastic behavior using the four-dimensional formalism of differential geometry. *Acta Mechanica*, 227(3):651–675, oct 2015.
- [5] E. Rouhaud, B. Panicaud, and R. Kerner. Canonical frame-indifferent transport operators with the four-dimensional formalism of differential geometry. *Computational Materials Science*, 77:120–130, sep 2013.
- [6] M. Jossic. *Contrôle actif et non-linéarités géométriques: le cas du gong xiaoluo*. PhD thesis, Sorbonne Université, 2017.
- [7] A. Chaigne, C. Touzé, and O. Thomas. Nonlinear vibrations and chaos in gongs and cymbals. *Acoustical Science and Technology*, 26(5):403–409, 2005.
- [8] M. Ducceschi. *Nonlinear Vibrations of Thin Rectangular Plates: A Numerical Investigation with Application to Wave Turbulence and Sound Synthesis*. PhD thesis, ENSTA, 2014.
- [9] F. Gautier, J-L. Le Carrou, A. Elmaian, and F. Bousquet. Acoustics of the cristal baschet. In *Proceedings of ISMA*, 2010.
- [10] A. Couineaux, F. Ablitzer, and F. Gautier. Cristal baschet: Modèle physique minimal décrivant l'émergence du son. In *16ème Congrès Français d'Acoustique, CFA2022*, 2022.
- [11] P. Asimov. *Musique – Images – Instruments 17*, chapter Une invention 'essentiellement française': seeing and hearing the Ondes Martenot in 1937. CNRS Editions, 2019.
- [12] L.D. Landau and E.M. Lifshitz. *The Classical Theory of Fields: Volume 2*, volume 2. Butterworth-Heinemann, 1975.
- [13] R. A. Grot and A. Eringen. Relativistic continuum mechanics part i—mechanics and thermodynamics. *International Journal of Engineering Science*, 4(6):611–638, dec 1966.
- [14] A. van der Schaft and D. Jeltsema. *Port-Hamiltonian Systems Theory: An Introductory Overview*, volume 1. Now Publishers, 2014.
- [15] V. Acary and B. Brogliato. *Numerical Methods for Nonsmooth Dynamical Systems*. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [16] A. Brugnoli, D. Alazard, V. Pommier-Budinger, and D. Matignon. Partitioned finite element method for the mindlin plate as a port-hamiltonian system. *IFAC-PapersOnLine*, 52(2):88–95, 2019.

<sup>1</sup>Voir l'instrument [ici](#).

<sup>2</sup>Voir l'instrument [ici](#).