

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

Sujet proposé au Collegium Musicae

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

Domaine scientifique principal de la thèse : Sciences Mécaniques, Acoustique, Électronique et Robotique (ED SMAER)

Directeur de thèse : Thomas Hélie (STMS-UMR9912). Rôle : Système Hamiltoniens à Ports [1, 2]

Co-encadrant 1 : Thierry Maniguet (CRC-USR 3224). Rôle : Lutherie électronique [3, 4]

Co-encadrante 2 : Emmanuelle Rouhaud (Laboratoire GAMMA3, Université de technologie de Troyes (UTT)). Rôle : Formulation espace-temps (4D) [5, 6, 7]

Mots-clé : 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. Lorsque ces vibrations mettent en jeu de grandes déformations, les sonorités produites s’enrichissent significativement (avec des timbres riches en harmoniques impairs pour les plaques à non linéarité symétrique par rapport au plan, ou bien avec tous les harmoniques dans les autres cas). Les très grandes déformations peuvent aller jusqu’à provoquer des changements de régimes (apparition de sous-harmoniques, résonances internes entendues comme des multiphoniques, voire transition vers le chaos 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-entretenuë (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 [8, 9, 10]. Dans cette thèse, on étudiera le cas de plaques et coques pour deux types d’objets musicaux :

- les structure Baschet excitées ou bien par frottement, ou bien par de nouveaux modes de jeu provoquant des régimes auto-entretenus [11],
- un diffuseur d’ondes Martenot : le diffuseur métallique [12].

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

La modélisation du comportement des plaques en grande déformation est un problème hautement non linéaire pour des raisons à la fois géométriques et de lois des matériaux (thermo-élasticité). 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. Pour apporter des réponses suffisantes, on se propose d'adapter une formulation intrinsèque relativiste (indépendante de 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 [13], dites objectives (invariance par changements d'observateurs) [14, 6], que l'on sait être essentielles quand il s'agit de modéliser les grandes déformations de la matière [15] et non satisfaites par de nombreux modèles standard.
2. On s'intéressera à la prise en compte d'effets thermo-mécaniques ou dissipatifs, d'abord pour des lois physiques connues [7, 5], puis à des classes généralisées énergétiquement bien posées [16] destinées à élaborer des matériaux mutants à des fins musicales.
3. On permettra l'excitation (distribuée ou ponctuelle) de ces structures en introduisant des ports d'interaction et exprimera ce système ouvert dans le formalisme des Systèmes Hamiltoniens à Ports [17] 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) [18], que l'on choisira en fonction des modes de jeu souhaités.

### 2.2 Simulation

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 [19], projection modale ou modes non linéaires [9]) tirant parti des propriétés des matrices creuses. Techniquement, on cherchera à développer des solveurs explicites (par technique de quadratisation de l'énergie [2]), itératifs massivement parallélisables, ou à convergence accélérée.

### 2.3 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, et un résonateur métallique d'onde Martenot de 1955. 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 simplifié (comportement quasi-linéaire) des petites déformations. Dans un second temps, conjointement avec le développement du modèle, on identifiera les paramètres complémentaires (non-linéarités essentielles) 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 reproduira ces fac-similés numériques. On proposera de nouveaux modes de jeux (à dynamique auto-entretenu) en les couplant à de nouvelles sources d'excitation. On produira des extrapolations de ces fac-similés par modifications de paramètres. On produira également des fac-similés pour des matériaux mutants au cours du temps. En fin de thèse, ces résultats pourraient bénéficier au développement de contrôle actif sur les instruments réels.

## References

- [1] Antoine Falaize and Thomas Hélie. Passive simulation of the nonlinear port-hamiltonian modeling of a rhodes piano. *Journal of Sound and Vibration*, 390:289–309, mar 2017.
- [2] N. Lopes, T. Hélie, and A. Falaize. Explicit second-order accurate method for the passive guaranteed simulation of port-hamiltonian systems. In *IFAC-LHMNLC*, volume 48, pages 223–228. Elsevier BV, 2015.
- [3] Thierry Maniguet. *Musique – Images – Instruments 17*, chapter La croix sonore et Obouhow, pionnier de la lutherie électronique. CNRS Editions, 2019.
- [4] Philippe Bruguière and Thierry Maniguet. *Musique – Images – Instruments 17*, chapter Les acquisitions d’instruments électroniques et électriques au musée de la Musique depuis son ouverture. CNRS Editions, 2019.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Roula Al Nahas, Alexandre Charles, Benoît Panicaud, Emmanuelle Rouhaud, Israa Choucair, Kanssoune Saliya, and Richard Kerner. Investigation on the use of a spacetime formalism for modeling and numerical simulations of heat conduction phenomena. *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, 45(3):223–246, jul 2020.
- [8] Antoine Chaigne, Cyril Touzé, and Olivier Thomas. Nonlinear vibrations and chaos in gongs and cymbals. *Acoustical Science and Technology*, 26(5):403–409, 2005.
- [9] Michele Ducceschi. *Nonlinear Vibrations of Thin Rectangular Plates: A Numerical Investigation with Application to Wave Turbulence and Sound Synthesis*. PhD thesis, ENSTA, 2014.
- [10] Stefan Bilbao. Next-generation sound synthesis. ERC Project, 2012-2016.
- [11] F. Gautier, J-L. Le Carrou, A. Elmaian, and F. Bousquet. Acoustics of the cristal baschet. In *Proceedings of ISMA*, 2010.
- [12] Peter Asimov. *Musique – Images – Instruments 17*, chapter Une invention ‘essentiellement française’: seeing and hearing the Ondes Martenot in 1937. CNRS Editions, 2019.
- [13] LD Landau and EM Lifshitz. *The Classical Theory of Fields: Volume 2*, volume 2. Butterworth-Heinemann, 1975.
- [14] Zdeněk Fiala. Time derivative obtained by applying the riemannian manifold of riemannian metrics to kinematics of continua. *Comptes Rendus Mécanique*, 332(2):97–102, feb 2004.
- [15] Richard A. Grot and A.Cemal Eringen. Relativistic continuum mechanics part i—mechanics and thermodynamics. *International Journal of Engineering Science*, 4(6):611–638, dec 1966.
- [16] Denis Matignon and Thomas Hélie. A class of damping models preserving eigenspaces for linear conservative port-hamiltonian systems. *European Journal of Control*, 19(6):486–494, dec 2013.
- [17] Arjan van der Schaft and Dimitri Jeltsema. *Port-Hamiltonian Systems Theory: An Introductory Overview*, volume 1. Now Publishers, 2014.
- [18] Vincent Acary and Bernard Brogliato. *Numerical Methods for Nonsmooth Dynamical Systems*. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [19] Andrea Brugnoli, Daniel Alazard, Valérie Pommier-Budinger, and Denis Matignon. Partitioned finite element method for the mindlin plate as a port-hamiltonian system. *IFAC-PapersOnLine*, 52(2):88–95, 2019.