

ED SMAER

Sujet de thèses 2013

Laboratoire : Institut Jean Le Rond d'Alembert, Équipe Lutherie-Acoustique-Musique, UMR CNRS 7190

Établissement de rattachement : UPMC

Directeur de thèse et section CNU ou CNRS : Jean-Loic Le Carrou (UPMC, CNU 60)

Codirection et section CNU et CNRS : Cyril Touzé (ENSTA-ParisTech, section 60) et Olivier Doaré (ENSTA-ParisTech, section 60).

Titre de la thèse : Vibrations non linéaires de cordes avec contact unilatéral. Application aux instruments de musique.

Collaborations dans le cadre de la thèse : collaboration Institut Jean Le Rond d'Alembert-UME (Unité de Mécanique, ENSTA-ParisTech)

Rattachement à un programme :

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

Résumé du sujet :

Ce sujet de thèse se propose d'étudier les modèles et méthodes numériques pour les vibrations non linéaires géométriques (grande amplitude) de corde en présence d'une non linéarité non régulière matérialisée par la présence d'un contact unilatéral. Les applications industrielles où ce type de couplage (non linéarité géométrique et non régulière) apparaît sont nombreuses et on se propose ici d'étudier en particulier le cas des instruments de musique à cordes. En effet, il en existe qui présentent des spécificités de couplage corde-structure de ce type (telles qu'un double chevalet ou une absence de frette par exemple) rendant caduc toute modélisation simple des conditions aux limites de la corde. Ces particularités de fabrications entraînent nécessairement une sonorité caractéristique qu'il est, pour l'heure, difficile à simuler.

Le travail de thèse consistera, dans un premier temps, à dresser un panorama des méthodes numériques existantes en intégration temporelle numérique pour les non linéarités non régulières. Une extension de ces travaux portera sur le cas du calcul des modes non linéaires pour les systèmes à non linéarité non régulières. Des comparaisons expérimentales sur un système modèle sont ensuite envisagées. Une modélisation fine de la condition aux limites, dans le cas de la tampoura, du sitar et des instruments sans frette sera ensuite mise en œuvre afin de proposer au final des modèles temporels pour la synthèse sonore.

Sujet développé (à présenter en 2 ou 3 pages maximum,
en précisant notamment le contexte, les objectifs, les résultats attendus)

Contexte

Ce sujet de thèse s'inscrit dans la problématique générale des vibrations de grande amplitude de structures minces en présence d'un contact unilatéral. La prise en compte des non linéarités géométriques couplées à la non linéarité non régulière provenant de la loi de contact soulève des problèmes d'ordre phénoménologique (apparition de précurseurs, couplages haute fréquence – dynamique basse fréquence) ainsi que numérique (choix de la régularisation, raideur numérique du problème, choix de l'intégrateur temporel). Ce type de problème se retrouve dans de nombreux cas industriels pratiques (citons par exemple les tubes de refroidissement entretoisés des centrales nucléaires [1], ou les contacts/frottements des aubes de turbomachines [2]) ainsi que dans les instruments de musique à corde (chevalet arrondi du sitar, chevalet double de la tampoura, instruments sans frette, harpion...). Dans le cadre de cette thèse, on souhaite d'une part développer des modèles numériques permettant de rendre compte de la dynamique non linéaire de cordes en présence de contact unilatéral, et d'autre part valider ces modèles par des expériences simples (exemple typique : montage avec double chevalet) et enfin appliquer ces résultats à la compréhension et à la modélisation d'instruments comme la tampoura et le sitar en vue de la synthèse sonore.

Objectifs

Le premier objectif de la thèse sera de dresser un état de l'art sur les méthodes numériques permettant le calcul efficace de la dynamique de systèmes vibrants en présence de contact unilatéral. La question de la régularisation du problème sera posée, sachant que le recours à des méthodes non régularisantes est aussi possible et sera étudiée [3,4]. Un panorama des méthodes numériques utilisées en dynamique non linéaire non régulière sera dressé afin de guider au mieux le choix à retenir pour un intégrateur temporel efficace permettant de coupler la non linéarité géométrique à la non linéarité non régulière. Des systèmes modèles seront ensuite étudiés par ordre de complexité croissante. On commencera par une corde linéaire sans raideur ajoutée avec contact unilatéral, puis l'effet de la raideur et des non linéarités géométriques sera ajoutée, en suivant par exemple le modèle de corde non linéaire développée dans [5]. Une expérience modèle sera montée afin de se rapprocher le plus possible du cas théorique et de contrôler au mieux les différents paramètres. Lors de ces développements, l'utilisation des modes non linéaires du système afin de comprendre finement la dynamique Hamiltonienne du système et la relier aux vibrations forcées mesurées, sera posée, sachant que ce point soulève aussi des problèmes théoriques quant au calcul des variétés invariantes en présence de non linéarité non régulière. Là encore ce sont des problématiques actuelles sur le sujet pour lesquelles certains laboratoires commencent à travailler et à montrer des prémises de résultats intéressants [1,6]. Enfin, dans un troisième temps les résultats obtenus tant en terme de maîtrise des développements numériques que des comparaisons expérimentales, seront mis à profit pour l'étude des instruments à corde que sont la tampoura et le sitar, pour lequel la présence d'un chevalet double donne une condition de double chevalet et de contact unilatéral [7]. Il est aussi envisagé de s'intéresser aux instruments à corde non frettés, pour lequel la condition aux limites imposée par le doigt demande une modélisation particulière, et entraîne des chocs entre la corde et le manche. La démarche sera de modéliser le plus finement possible la condition aux limites donnée par l'instrument (fil juari de la tampoura, chevalet double et courbe du sitar), de développer des modèles rendant

compte finement de cette physique, de les confronter à des mesures sur instruments réels et de les utiliser ensuite en vue de la synthèse sonore par modèles physiques.

Résultats attendus

- Obtenir une maîtrise des méthodes numériques propres à la non linéarité non régulière et aux lois de contact unilatéral, développer une expertise en méthodes non régularisantes et un contrôle fin de la régularisation.
- S'assurer de la justesse des modélisation par le biais de comparaison à des expériences modèles soigneusement contrôlée.
- Développer des méthodes de calcul des modes non linéaires en présence de non linéarité non régulière.
- développer des modèles de synthèse sonore pour les instruments à cordes présentant un chevalet double ou une condition aux limites s'en approchant (exemple visée : tampoura, sitar, instruments sans frette). Modéliser et comprendre le son si spécifique de ses instruments.

Profil du candidat

Le candidat recherché aura de solides compétences en acoustique et vibrations et présentera un intérêt personnel pour l'objet musical.

Références

- [1] E.H. Moussi, S. Bellizzi, C. Cochelin et I. Nistor, *Nonlinear normal modes of a two degrees of freedom oscillator with a bilateral elastic stop*, 18e symposium « vibrations, chocs et bruits », 2012.
- [2] M. Legrand, A. Batailly, B. Magnain, P. Cartraud and C. Pierre, *Full three-dimensional investigation of structural contact interactions in turbomachines*, Journal of Sound and Vibration, 331(11), 2578-2601, 2012.
- [3] B. Brogliato, *Nonsmooth Mechanics*, Springer Verlag London, second edition, 1999.
- [4] V. Acary, B. Brogliato, *Numerical Methods for Nonsmooth Dynamical Systems. Applications in Mechanics and Electronics*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, vol.35, 2008.
- [5] J. Chabassier: *Modélisation et simulation numérique d'un piano par modèles physiques*, thèse de l'école Polytechnique, 2012.
- [6] D. Laxalde and M. Legrand, *Nonlinear Modal Analysis of Mechanical Systems with Frictionless Contact Interfaces*, Computational Mechanics, 47(4), 2011, 469-478.
- [7] C. Valette et C. Cuesta: *Mécanique de la corde vibrante*, Hermès, 1993.