

PROGRAMME INTITUTS ET INITIATIVES
Appel à projet – campagne 2021
Proposition de projet de recherche doctoral (PRD)
CM - Collegium Musicae

**Intitulé du projet de recherche doctoral (PRD): Synthèse sonore d'instruments de musique à cordes
présentant des non-linéarités de contacts**

Directeur.rice de thèse porteur.euse du projet (titulaire d'une HDR) :

NOM : **Le Carrou** Prénom : **Jean-Loïc**

Titre : Maître de Conférences des Universités ou

e-mail : jean-loic.le_carrou@sorbonne-universite.fr

Adresse professionnelle : Campus Pierre et Marie Curie, 4 place Jussieu, 44-54, 514
(site, adresse, bât., bureau)

Unité de Recherche :

Intitulé : Institut Jean Le Rond d'Alembert, équipe Lutheries-Acoustique-Musique (LAM)

Code (ex. UMR xxxx) : UMR 7190

**École Doctorale de rattachement de l'équipe (future école ED391-SMAER
doctorale du/de la doctorant.e) :**

**Doctorant.e.s actuellement encadré.e.s par la.e directeur.rice de thèse (préciser le nombre de doctorant.e.s,
leur année de 1^{er} inscription et la quotité d'encadrement) : 4, 2017 (50%, soutenance printemps 2021), 2019
(25%), 2020 (20% et 50%)**

Co-encadrant.e :

NOM : **Touzé** Prénom : **Cyril**

Titre : Professeur des Universités ou HDR

e-mail : cyril.touze@ensta-paris.fr

Unité de Recherche :

Intitulé : Institut des Sciences de la Mécanique et Applications Industrielles

Code (ex. UMR xxxx) : UMR 8193

École Doctorale de rattachement : **Choisissez un élément :**
Ou si ED non Alliance SU : **IP Paris**

Doctorant.e.s actuellement encadré.e.s par la.e co-directeur.rice de thèse (préciser le nombre de



Co-encadrant.e :

NOM :

Prénom :

Titre : Choisissez un élément : ou

HDR

e-mail :

Unité de Recherche :

Intitulé :

Code (ex. UMR xxxx) :

Choisissez un élément :

École Doctorale de rattachement :

Ou si ED non Alliance SU :

Doctorant.e.s actuellement encadré.e.s par la.e co-directeur.rice de thèse (préciser le nombre de doctorant.e.s, leur année de 1^e inscription et la quotité d'encadrement) :

Cotutelle internationale : Non Oui, précisez Pays et Université :

Selon vous, ce projet est-il susceptible d'intéresser une autre Initiative ou un autre Institut ?

Non Oui, précisez Choisissez l'institut ou l'initiative :

Description du projet de recherche doctoral (*en français ou en anglais*) :

Ce texte sera diffusé en ligne : il ne doit pas excéder 3 pages et est écrit en interligne simple.

Détailler le contexte, l'objectif scientifique, la justification de l'approche scientifique ainsi que l'adéquation à l'initiative/l'Institut.

Le cas échéant, préciser le rôle de chaque encadrant ainsi que les compétences scientifiques apportées. Indiquer les publications/productions des encadrants en lien avec le projet.

Préciser le profil d'étudiant(e) recherché.

Les contacts entre une corde vibrante et un obstacle rigide sont fréquemment rencontrés dans les instruments, qu'ils soient désirés ou non, et apportent une identité sonore forte à l'instrument. De manière plus générale, nous avons affaire à un problème de dynamique non linéaire de systèmes continus vibrants en présence d'un contact unilatéral. De par l'intérêt mathématique et physique que ce type de problème suscite, une littérature assez abondante existe sur le sujet. Pour des cordes souples sans effet de dispersion ou de perte, des solutions analytiques sont trouvées pour des obstacles ponctuels ou plans et pour certaines conditions initiales [1,2]. Des théorèmes d'existence et d'unicité de solution, pour un ou plusieurs obstacles ponctuels avec une corde finie ou infinie, ont aussi été démontrés [3]. Pour des cordes présentant de la raideur et des pertes, différentes méthodes numériques sont développées: de type guides d'ondes couplé aux différences finies [4], montrant l'importance de la dispersion de la corde, de type modal pour simuler un obstacle modélisant le cas de la tampoura [5]. Des méthodes conservatives avec une force de contact régularisée sont aussi utilisées, basées sur la discrétisation des équations Hamiltoniennes du système [6] ou utilisant les différences finies [7]. De par leur nature temporelle, ces méthodes ne permettent pas de prendre en compte l'amortissement de la corde dont la dépendance fréquentielle doit être ajustée pour chaque mode [8]. Dans le cadre de travaux de thèse récents de Clara Issanchou [9], une méthode numérique robuste permettant une gestion raffinée des phénomènes dissipatifs et prenant en compte le contact à travers une description régularisée a été mise en place avec succès. La modélisation développée, dite modale-mixte, tire partie des atouts d'un schéma numérique conservant l'énergie à l'aide d'une régularisation particulièrement bien choisie de la force de contact [7] tout en étendant à la gestion de lois d'amortissements fréquentielles de la corde. Le cas d'un obstacle ponctuel modélisant le cas de la tampoura [10] ainsi que le cas où la corde frappe plusieurs frettes (cas de la basse électrique) [11] ont été simulés et validés expérimentalement. Cependant, la méthode développée possède l'inconvénient de ne présenter des solutions convergées que pour des pas de temps extrêmement petits, si bien que les temps de calcul associés sont grands. Le travail proposé pour cette thèse de doctorat vise donc à (i) améliorer les techniques de résolution numérique, en particulier pour diminuer les temps de calcul associés, sans renier sur la qualité des solutions obtenues et à (ii) inclure d'autres éléments dans la modélisation afin d'obtenir un modèle complet de jeu de corde permettant de simuler l'attaque (excitation par le doigt ou un plectre, corde pincé/frappée), les contacts avec l'instrument (au chevalet/sur la touche/aux frettes), voire d'autres interactions avec des éléments extérieurs (cas du piano préparé par exemple).

Les objectifs de ce travail doctoral peuvent donc se répartir en deux catégories distinctes, avec un volet purement numérique (amélioration des méthodes) et un volet de modélisation pour enrichir le modèle en prenant en compte beaucoup plus de paramètres de jeu. A terme, l'idée est d'obtenir un



outil suffisamment robuste, précis et efficace afin de pouvoir l'utiliser soit dans un contexte d'aide à la facture, soit dans un contexte de composition assistée par ordinateur (synthèse sonore par modèles physiques). Dans l'optique d'aide à la facture, des rencontres avec des facteurs d'instruments nous ont en effet montré que, pour les instruments indiens en particulier, les réglages du chevalet et du fil juari sont très fins et difficiles, et qu'il existe un manque d'un outil numérique prédictif permettant de montrer a priori au facteur les résultats de ces actions de réglage sur le son produit. Nous détaillons maintenant les axes de recherche des deux volets :

1- Amélioration des méthodes numériques

Pour améliorer le code de calcul déjà développé, deux idées fortes émergent et seront prises en compte dans le travail de thèse : (i) Découpler le nombre de points de la discrétisation spatiale et le nombre de modes retenu dans l'expansion modale (pour le modèle avec force de contact régularisée). Ce point devra permettre de raffiner spatialement les zones de contact, tout en conservant un nombre de mode raisonnable par rapport à la dynamique mise en jeu. Des gains importants en temps de calcul sont attendus, sans perte de précision. (ii) Développer une méthode d'intégration numérique différente, ne reposant plus sur une régularisation de la force de contact. En effet, des familles de méthodes numériques (appelées méthodes non régulières ou méthodes non lisses) n'utilisent pas de technique de pénalisation afin d'exprimer la force de contact, et n'autorisent plus d'interpénétration entre les deux objets en contact. De ce choix de modélisation découle beaucoup de conséquences importantes. En particulier, il n'y a plus de paramètres de pénalisation à régler de manière empirique pour évaluer la force de contact. Deuxièmement, les schémas numériques n'utilisent pas de boucle de Newton-Raphson à chaque pas de temps, permettant de gagner un temps de calcul précieux. Les méthodes reposent sur un formalisme mathématique différent, utilisant la théorie de la mesure et des inclusions différentielles [12]. Au cours de la thèse, des méthodes d'intégration non lisse seront implémentées et testées afin de comparer leurs performances à la méthode régularisée précédemment développée.

2. Modélisation d'effets réalistes et raffinement du modèle complet

Divers effets non encore pris en compte seront rajoutés dans la modélisation afin d'obtenir un modèle complet permettant de simuler, dans un environnement numérique autonome, les vibrations d'une corde musicale, avec excitation appropriée par le musicien (ou autre dispositif mécanique) et vibrations avec contacts. Les éléments manquants à développer et inclure dans la modélisation sont les suivants : prise en compte de l'excitation avec différents types d'excitateur et leur modélisation adaptée (excitation par le doigt du musicien, par un plectre ou par un marteau) et prise en compte de l'ensemble de la structure. Il est aussi envisagé de s'intéresser aux instruments à cordes 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. On pourra, pour cela, se baser sur des travaux récents sur la famille des violons [13]. La démarche sera de modéliser le plus finement possible la condition aux limites donnée par l'instrument (fil juari de la tampoura, chevalet double, courbe du sitar, forme des frettes), de développer des modèles rendant compte de cette physique, de prendre en compte le jeu de l'instrumentiste et de les confronter à des mesures sur instruments réels effectuées en situation de jeu et de les utiliser ensuite en vue de la synthèse sonore par modèles physiques.

Résultats attendus

(i) 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. (ii) S'assurer de la justesse des modélisations par le biais de comparaison à des expériences modèles soigneusement contrôlée. (iii) Développer des modèles de synthèse sonore pour les instruments à cordes présentant un chevalet plat de courbure finement contrôlée



(aide au réglage de la *rudra vina*) des contacts cordes/touches (basse électrique fretless lors d'un jeu en slap, jeu en pizzicato de la contrebasse). Modéliser et comprendre le son si spécifique de ses instruments en fonction des conditions de jeu et de leurs constitutions.

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] L. Amerio, Continuous solutions of the problem of a string vibrating against an obstacle. *Rendiconti del Seminario Matematico della Università di Padova*, 59, pp. 67-96, 1978
- [2] H. Cabannes, Cordes vibrantes avec obstacle, *Acustica*, 55, pp. 14-20, 1984
- [3] M. Schatzman, Un problème hyperbolique du 2eme ordre avec contrainte unilatéral : la corde vibrante avec obstacle ponctuel, *Journal of Differential Equations*, 36, pp. 295-334, 1980
- [4] S. Siddiq, A physical model of the nonlinear sitar string, *Archives of acoustics*, 37(1), pp. 73-79, 2012
- [5] C. Valette et C. Cuesta, *Mécanique de la corde vibrante*, Hermès, Paris, 1993
- [6] V. Chatziioannou et M. Van Walstijn, Energy conserving schemes for the simulation of musical instrument contact dynamics, *Journal of Sound and Vibration*, 339, pp. 262-279, 2015
- [7] S. Bilbao, A. Torin et V. Chatziioannou, Numerical modeling of collisions in musical instruments. *Acta acustica united with acustica*, 101, pp. 155-173, 2015
- [8] A. Paté, J-L. Le Carrou et B. Fabre, Predicting the decay time of solid electric guitar tones, *Journal of the Acoustical Society of America*, 135(5), pp. 3045-3055, 2014
- [9] C. Issanchou, S. Bilbao, J-L. Le Carrou, C. Touzé et O. Doaré, A modal-based approach for the non linear vibration of strings against a unilateral obstacle: simulations and experiments in the pointless case, *Journal of Sound and Vibration*, 393, pp. 229-251, 2017
- [10] C. Issanchou, *Vibrations non linéaires de cordes avec contact unilatéral. Application aux instruments de musique*, Thèse de Doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, 2017
- [11] C. Issanchou, J-L. Le Carrou, C. Touzé, B. Fabre et O. Doaré, String / frets contacts in the electric bass sound: Simulations and experiments, *Applied Acoustics*, 129, pp. 217-228, 2018
- [12] V. Acary et B. Brogliato : *Numerical methods for nonsmooth dynamical systems*, Springer, 2008.
- [13] O. Inacio, J. Antunes et M.C.M. Wright, Computational modeling of string-body interaction for the violin family and simulation of wolf notes, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 310, 260-286, 2008.

**Merci d'enregistrer votre fichier au format PDF et de le nommer :
«ACRONYME de l'initiative/institut – AAP 2021 – NOM Porteur.euse Projet »**

*Fichier envoyer simultanément par e-mail à l'ED de rattachement et au programme :
cd_instituts_et_initiatives@listes.upmc.fr avant le 20 février.*