OFFRE DE CONTRAT DOCTORAL (36 mois) • 2027–2030

Etude de la jouabilité des instruments de musique auto-oscillants sous l'angle de la dynamique non linéaire : bassins d'attraction et dynamiques transitoires des paramètres de contrôle

Contexte

Les **systèmes dynamiques non linéaires** - qui comprennent des systèmes allant des lasers pulsants aux instruments de musique auto-oscillants en passant par des modèles de climat ou d'épidémies - sont le siège de **comportement complexes** : coexistence de multiples régimes stables pour des paramètres identiques, transitions soudaines entre régimes, grande sensibilité aux conditions initiales … **Comprendre et prédire** la dynamique de ces systèmes non linéaire demeure un enjeu scientifique majeur.

L'essor de l'analyse de bifurcations ces dernières décennies a permis de nombreux progrès, en donnant accès à des **diagrammes de bifurcation** qui représentent idéalement l'ensemble des régimes (stables et instables) qu'un système peut produire, en fonction de paramètres d'intérêt du système. Néanmoins, elle démontre aujourd'hui aussi ses limites. Si elle permet par exemple de mettre en évidence les plages de paramètre pour lequel le système est **multistable**, c'est-à-dire que plusieurs régimes stables coexistent pour un même jeu de paramètres, elle ne permet pas de savoir quel régime est atteint en pratique.

Les instruments de musique auto-oscillants (instruments à vent ou à cordes frottées) constituent un contexte idéal pour étudier des phénomènes généraux en dynamique non linéaire : la production du son relève d'une grande diversité de mécanismes non linéaires, relevant de champs disciplinaires variés (mécanique du contact, aéroacoustique, biomécanique …), et ils sont capables de produire une grande diversité de régimes sonores dont les propriétés dépendent, souvent de façon très sensible, de **paramètres de conception** et de **paramètres de contrôle** liés au jeu du musicien.

Du point de vue musical, les zones de **multistabilité** sont particulièrement intéressantes : elles permettent à l'instrumentiste d'accéder à une large palette de régimes sonores, mais posent le problème du contrôle. **Comme accéder, en pratique, à un régime donné parmi les différents régimes sonores possibles ?** Du point de vue des systèmes dynamiques, cela pose la question des **bassins d'attractio**n, c'est à dire des conditions initiales qui permettent au système de converger vers un régime particulier.

Des travaux récents menés notamment au LAUM et au LMA [1,2] ont permis de développer des outils numériques permettant de calculer les **frontières entre bassins d'attraction**, appliqués notamment à des modèles physiques d'instruments de musique. En parallèle, des travaux préliminaires [3,4] ont démontré que **l'évolution temporelle des paramètres de contrôle** - qui intervient par exemple lors des **transitoires d'attaque** lorsque l'instrumentiste commence à jouer une note et fait varier rapidement la pression dans sa bouche ou la vitesse de son archet - jouait un rôle crucial dans la sélection du régime atteint, voire pouvait provoquer des transitions inattendues entre régimes. Ces observations sont en lien direct avec les phénomène de basculement induit par la dynamique des paramètres (**rate-induced tipping**), étudié récemment, principalement dans des modèles climatiques [5].

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet BEBOP, financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), qui vise à dépasser les limites actuelles de l'analyse de bifurcations pour mieux comprendre et prédire le comportement complexe des systèmes dynamiques non linéaires en général, et des instruments de musique auto-oscillants en particulier.

Objectifs

Cette thèse vise à **caractériser les bassins d'attraction** dans les instruments de musique auto-oscillants, à la fois numériquement et expérimentalement, en lien avec des aspects concrets de contrôle de l'instrument dans un contexte musical. Ce faisant, l'objectif est également de contribuer à une meilleure compréhension de phénomènes complexes en dynamique non linéaire, tels que les mécanismes de *rate-induced tipping*.

Méthodologie

La thèse combinera **modélisation, simulations numériques et expérimentations**.

Un **premier axe** de travail visera à tirer partie des méthodes numériques développées récemment au LAUM pour caractériser **l'influence de paramètres de conception et de jeu sur la géométrie des bassins d'attraction** de modèles d'instruments à anche (saxophone).

Un **second axe** de travail visera à explorer les **liens entre les bassins d'attraction et les stratégies de contrôle des instrumentistes.** Les problématiques suivantes seront notamment abordés :

- quelle est l'influence de petites perturbations des paramètres de contrôle (par exemple, vitesse de l'archet ou pression dans la bouche) sur les variables d'état du système et donc sur le régime joué en pratique ?
- Les transitoires d'attaque, au cours desquels les paramètres de contrôle varient rapidement, peuvent ils permettre aux instrumentistes de naviguer entre les bassins d'attraction et donc de contrôler en pratique le régime joué en cas de multistabilité ? En d'autres termes, les instrumentistes utilisent-ils le phénomène de *rate-induced tipping* dans leur pratique musicale ?

Ces différents axes de travail seront explorées à la fois **numériquement et expérimentalement**. Ces travaux s'appuieront sur des méthodes numériques et des bancs de mesure existants, qui pourront nécessiter des adaptations et des évolutions. Pour finir, une attention particulière sera apportée à la mise en perspective des résultats obtenus dans le contexte plus large des problématiques actuelles en dynamique non linéaire, au-delà des seules applications aux instruments de musique.

Profil de la candidate ou du candidat

Le poste est ouvert aux titulaires ou futur titulaires d'un Master en physique non linéaire, en acoustique, en mécanique ou en mathématiques appliquées. Des notions de dynamique non linéaire, des compétences en programmation scientifique et un goût pour l'expérimentation seront appréciées. Un intérêt pour les instruments de musique ou une expérience musicale serait un plus.

Environnement et encadrement

La thèse se déroulera au **Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans (LAUM)**, Unité Mixte de Recherche sous la tutelle du CNRS et de Le Mans Université. Elle sera encadré par Soizic Terrien, chargée de recherche CNRS, Frédéric Ablitzer, maître de conférences à Le Mans Université et Baptiste Bergeot, maître de conférences à l'INSA Centre Val de Loire.

Cette thèse s'inscrivant dans le cadre d'un projet collaboratif entre le LAUM au Mans, le Lamé à Blois et le LMA à Marseille, des déplacements ponctuels sont à prévoir à Marseille et à Blois au cours de la thèse. Des interventions dans des conférences nationales et internationales sont prévues au cours de la thèse.

La rémunération suit les grilles du CNRS.

Candidature

CV, lettre de candidature, relevés de notes de M1 et M2, intitulé du stage de fin d'étude et contacts de référents éventuels sont à envoyer à Soizic Terrien au plus tard le 31 mai 2027 (soizic.terrien@univ-lemans.fr). Date de démarrage de la thèse : 1er octobre 2027.

Références bibliographiques liées au projet

[1] Passa, T., Terrien, S., Maugeais, S., & Gazengel, B. (2025). Basins of attraction of periodic solutions in a multistable model of self-oscillating musical instrument. *Journal of Sound and Vibration*, 119467.

[2] Pégeot, M., Colinot, T., Doc, J. B., Fréour, V., & Vergez, C. (2024). Playability of self-sustained musical instrument models: statistical approaches. *Acta Acustica*, *8*, 74.

[3] Bergeot, B., Terrien, S., & Vergez, C. (2024). Predicting transient dynamics in a model of reed musical instrument with slowly time-varying control parameter. *Chaos*, *34*(7).

[4] Terrien, S., Bergeot, B., Vergez, C., & Missoum, S. (2025). Basins of attraction in a dynamical system with a time-varying control parameter: The case of attack transients in a simple model of reed musical instrument. *Journal of Sound and Vibration*, *618*, 119241.
[5] Ritchie, P. D., Alkhayuon, H., Cox, P. M., & Wieczorek, S. (2023). Rate-induced tipping in natural and human systems. *Earth System Dynamics*, *14*(3), 669-683.