OFFRE DE STAGE DE MASTER 2 (6 mois) • 2027

Geste du musicien et points de bascule dans un modèle d'instrument à anche : effets de la variation temporelle simultanée de deux paramètres de contrôle

Ce stage est **financé par l'Agence Nationale de la Recherche** (ANR) dans le cadre du projet **BEBOP** (*Beyond Classical Bifurcation Analysis: New Perspectives for Mechanical Engineering*).

Une poursuite en thèse sur ce sujet, **financée par ce même projet**, est envisageable à l'issue du stage.

Contexte

De nombreux **systèmes dynamiques non linéaires** rencontrés en physique, en biologie, en sciences du climat ou en ingénierie présentent plusieurs états stables pour un même jeu de paramètres : on parle de **multistabilité**. **Comprendre** et **prédire** la dynamique complexe qui en résulte demeure aujourd'hui un **enjeu scientifique majeur**.

Au cours des dernières décennies, l'analyse classique des bifurcations est devenue un outil courant, bien au-delà des laboratoires de recherche. Si elle révèle les régimes permanents possibles (stables et instables) pour un jeu de paramètres constants donné, elle ne prédit pas l'effet de l'évolution temporelle de ces paramètres. Celui-ci est pourtant crucial : dans les systèmes multistables à paramètres variables dans le temps, le régime d'oscillation obtenu ne dépend pas seulement des valeurs atteintes par les paramètres, mais aussi de la vitesse, ou **taux de variation**, avec laquelle ils évoluent. En théorie des systèmes dynamiques, ce phénomène relève des **basculements induits par le taux de variation** (*rate-induced tipping* ou *R-tipping)* [1, 2], concept développé récemment, principalement en sciences du climat et en écologie.

Les **instruments de musique auto-oscillants**, tels que le saxophone, constituent un cadre idéal pour étudier ce phénomène en ingénierie mécanique. En effet, (i) ils sont multistables : la note souhaitée n'est généralement pas le seul régime stable possible pour un doigté donné ; (ii) pendant l'attaque d'une note ou le passage entre notes, le musicien fait varier plusieurs paramètres de contrôle ; et (iii) ils disposent de modèles connus, dont certains sont à la fois simples et représentatifs de comportements complexes, et ils se prêtent facilement à l'expérimentation.

Des travaux récents, menés notamment au LaMé, ont montré que le R-tipping éclaire la sélection des régimes en situation de bistabilité dans des modèles simplifiés de saxophone [3, 4] et de violon [5]. Ils ouvrent la voie à une meilleure compréhension du lien entre geste instrumental et son produit, et soulignent l'importance de ce phénomène en ingénierie mécanique.

Verrous scientifiques et méthodologie

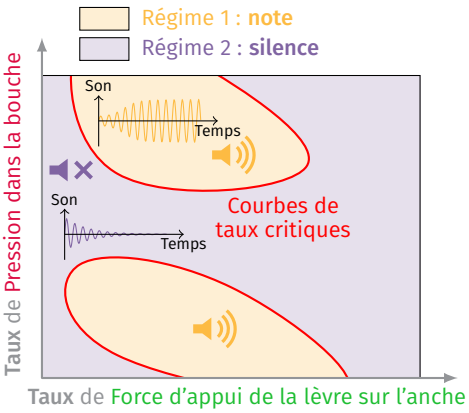
La théorie du R-tipping reste pour l'essentiel **monoparamétrique**, et a surtout été développée sur des modèles conceptuels du climat. Or, en ingénierie mécanique comme en acoustique musicale, les systèmes réels sont pilotés par **plusieurs paramètres variant simultanément**. C'est typiquement le cas du geste du saxophoniste, qui correspond à la variation d'au moins deux paramètres : la pression dans la bouche et la force d'appui de la lèvre sur l'anche. Prédire les basculements pour de tels systèmes reste, à ce jour, une question de recherche largement ouverte.

Quand un seul paramètre varie puis se stabilise à une valeur cible, il peut exister un **taux critique** au-delà duquel le système bascule d'un état stable à un autre. Ce seuil constitue un point de bascule (*tipping point*). Un outil récent [3 ,4], la **séparatrice de basculement** (ou **R-séparatrice**), a permis de caractériser le point de bascule d'un modèle simplifié bistable de saxophone, à un seul paramètre (pression dans la bouche). Pour le modèle le plus simple [3], la R-séparatrice est une trajectoire particulière de l'espace d'état (amplitude de la pression dans le bec), augmenté de la pression dans la bouche considérée comme variable supplémentaire. Elle partage cet espace en deux régions : selon le côté où se trouve la condition initiale, le système rejoint l'un ou l'autre régime. La R-séparatrice dépendant du taux de variation, le R-tipping survient lorsque, pour une condition initiale donnée, un changement de taux fait passer la séparatrice de l'autre côté de celle-ci. Le taux critique est celui pour lequel la condition initiale se trouve exactement sur la séparatrice.

Ce stage permettra au ou à la stagiaire de développer, sur des exemples pédagogiques mais représentatifs, des **compétences générales en dynamique non linéaire** — applicables dans de nombreux domaines, de l'ingénierie mécanique aux sciences climatiques — tout **en abordant une question de recherche** actuelle.

Le cadre de recherche proposé est le suivant :

1. **Choix d'un modèle minimal bistable** d'instrument à anche parmi les modèles existants, à deux paramètres de contrôle, et établissement de son diagramme de bifurcation dans le plan de ces paramètres afin d'identifier les zones de bistabilité (analytiquement et par continuation numérique).
2. **Appropriation des résultats existants** dans le cas d'un seul paramètre variable dans le temps [3, 4] : reproduction des simulations temporelles et détermination de la R-séparatrice et du taux critique de basculement.
3. **Extension à deux paramètres variant simultanément** : première **cartographie du régime final dans le plan des deux taux de variation** par identification des **courbes de taux critiques** (voir la figure ci-contre).



Profil recherché

Étudiant·e en Master 2 ou en dernière année d'école d'ingénieur, en mécanique, acoustique, physique ou mathématiques appliquées.

Des bases en systèmes dynamiques non linéaires et/ou en vibrations non linéaires ; une pratique de la programmation scientifique ; ainsi qu'un goût aussi bien pour la modélisation et l'analyse mathématique que pour la simulation numérique et le travail expérimental seront appréciés.

Un intérêt pour la musique ou une pratique instrumentale serait un plus, sans être requis.

Environnement et encadrement

Le stage sera effectué dans l'équipe *Dynamique et Vibrations des Structures* (DVS) du **Laboratoire de mécanique Gabriel Lamé** (LaMé, UR 7494) sur le campus de Blois de l'INSA Centre Val de Loire, en collaboration avec le Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans (LAUM, UMR CNRS 6613). L'encadrement sera assuré par :

- Baptiste BERGEOT, Maître de conférences HDR, LaMé
- Soizic TERRIEN, Chargée de Recherche CNRS, LAUM

Gratification : environ 680 €/mois (barème légal en vigueur).

Candidature

CV, lettre de candidature, relevés de notes de M1-M2 (ou équivalent) et contacts d'un ou deux référents éventuels sont à envoyer à : **Baptiste Bergeot** (baptiste.bergeot@insa-cvl.fr).

Date de début de stage : février/mars 2027

Références bibliographiques

1. Ashwin, P., S. Wieczorek, R. Vitolo, & P. Cox. *Tipping Points in Open Systems: Bifurcation, Noise-Induced and Rate-Dependent Examples in the Climate System*. Philos. Trans. R. Soc. A 370.
2. Wieczorek, S., C. Xie, & P. Ashwin (2023). *Rate-Induced Tipping: Thresholds, Edge States and Connecting Orbits*. Nonlinearity 36, 3238–93.
3. Bergeot, B., S. Terrien, & C. Vergez (2024). Predicting Transient Dynamics in a Model of Reed Musical Instrument with Slowly Time-Varying Control Parameter. Chaos: 34(7) : 073146.
4. Terrien, S., B. Bergeot, C. Vergez, & S. Missoum (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*. J. Sound Vib. 618: 119241.