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

Geste du musicien et points de bascule dans les instruments auto-oscillants : effets conjoints de la vitesse de variation de plusieurs paramètres de contrôle et du bruit

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

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 permet pas de prédire l'influence de l'évolution temporelle de ces paramètres. Cette influence s'avère pourtant cruciale. En effet, dans les systèmes multistables dont les paramètres varient au cours du 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], notion développée récemment, principalement dans le contexte du climat et de l'écologie.

Les **instruments de musique auto-oscillants**, tels que le saxophone ou le violon, 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 ou une longueur de corde donnés ; (ii) pendant l'attaque d'une note ou le passage d'une note à une autre, le musicien fait varier en continu plusieurs paramètres de contrôle (la pression dans la bouche et la force d'appui de la lèvre sur l'anche pour un instrument à anche, la vitesse de l'archet et sa force d'appui sur la corde pour un instrument à cordes frottées) ; 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 objectifs

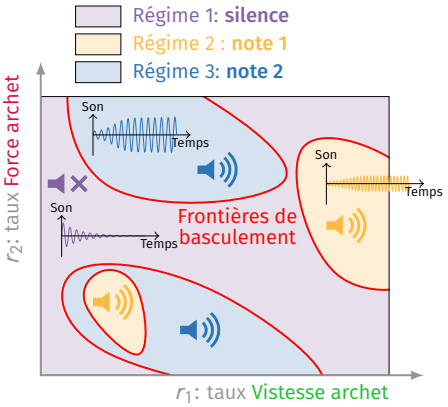
La théorie du R-tipping reste pour l'essentiel **monoparamétrique** et **déterministe**, et a surtout été développée sur des modèles conceptuels du climat. Or, en ingénierie mécanique comme en acoustique musicale, les systèmes réels sont pilotés par **plusieurs paramètres variant simultanément** et soumis à des **perturbations aléatoires**. C'est typiquement le cas du geste instrumental, qui correspond à la variation d'au moins deux paramètres de contrôle dans un système intrinsèquement bruité (turbulence de l'écoulement, fluctuations du contrôle). La prédiction des basculements pour de tels systèmes demeure, 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, 5], la **séparatrice de basculement** (ou **R-séparatrice**), a permis de caractériser le point de bascule de modèles simples, à un seul paramètre et dans un cadre déterministe. En régime bistable, la R-séparatrice est une trajectoire (ou une famille de trajectoires) de l'espace d'état augmenté du paramètre, qui partage cet espace en deux : 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.

L'**objectif principal** de la thèse est d'étendre le cadre établi dans [3, 4, 6] à des situations plus réalistes, combinant variation simultanée de plusieurs paramètres, multistabilité impliquant plus de deux régimes et présence de bruit, puis de valider expérimentalement ces résultats.

Il se décline en quatre sous-objectifs :

O1 — Caractériser les frontières de basculement. Lorsque plusieurs paramètres varient simultanément, le point de bascule n'est plus un nombre unique : il devient une **frontière de basculement** dans l'espace des taux de variation. La figure ci-contre illustre un exemple de cartographie attendue dans le cas du violon.



O2 — Quantifier l'effet cumulé du bruit et des taux de variation. La présence de bruit, même de très faible intensité, peut modifier significativement les basculements prédits dans un cadre déterministe. L'objectif est alors de comparer les cartographies déterministes établies ci-dessus à leurs équivalents bruités, exprimés en termes de **probabilité de basculement**.

O3 — Confronter les prédictions à l'expérience. Les cartographies de basculement, déterministes et bruitées, seront comparées à des mesures réalisées en laboratoire, à l'aide de **dispositifs de jeu contrôlés** (bouche artificielle, archet motorisé) permettant d'imposer des variations reproductibles de plusieurs paramètres.

O4 (de manière plus prospective et exploratoire) — Relier ces résultats à des gestes instrumentaux réalistes, et, par là, aux **stratégies de jeu des musiciens experts**.

Méthodologie

En poursuivant ces objectifs, le ou la futur·e doctorant·e pourra développer, sur des exemples, des **compétences générales en dynamique non linéaire** — applicables dans de nombreux domaines, de l'ingénierie mécanique aux sciences climatiques — tout **en abordant des questions de recherche actuelles**. Le cadre de recherche proposé est le suivant :

1. **Modélisation :** choix et, si nécessaire, réduction de modèles existants d'instruments auto-oscillants (anches [6] et cordes frottées [5]) afin de disposer de modèles minimaux mais représentatifs, multistables et multiparamétriques.
2. **Cadre déterministe :** développement de méthodes théoriques et numériques pour définir et calculer les R-séparatrices en présence de variations multiparamétriques et d'une multistabilité d'ordre supérieur à deux, afin de déterminer les frontières de basculement.
3. **Cadre probabiliste :** après une étude bibliographique des approches théoriques et numériques existantes, mise en œuvre d'un cadre pour le calcul des probabilités de basculement. Des simulations de type Monte Carlo fourniront dans un premier temps des résultats de référence.
4. **Validation expérimentale :** campagnes de mesure sur les bancs d'essai des partenaires du projet BEBOP, pour les cordes frottées (LAUM, Le Mans) et/ou les anches (LMA, Marseille).
5. **Confrontations à des profils réalistes :** exploitation de données expérimentales existantes, afin d'identifier des situations de R-tipping sur des instruments réels et d'en extraire les profils temporels des paramètres de contrôle associés.

Fidèle à l'**ambition de BEBOP**, ce travail mettra ses résultats en perspective au-delà des instruments de musique, dans le champ plus large de l'ingénierie mécanique et des problématiques actuelles de dynamique non linéaire.

Profil recherché

Titulaire (ou futur·e titulaire) d'un Master 2 ou d'un diplôme 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

La thèse sera menée 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 étroite collaboration avec les partenaires du projet BEBOP : le Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans (LAUM, UMR CNRS 6613) et le Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (LMA, UMR CNRS 7031) de Marseille. Dans ce cadre, des séjours de recherche pourront avoir lieu au Mans et/ou à Marseille.

L'encadrement sera assuré par :

- Baptiste BERGEOT, Maître de conférences HDR, LaMé, directeur de thèse
- Soizic TERRIEN, Chargée de Recherche CNRS, LAUM, co-encadrante
- Christophe VERGEZ, Directeur de Recherche CNRS, co-encadrant

Rémunération : 2300 € brut/mois, soit environ 1850 € net, avec possibilité de missions d'enseignement rémunérées en complément.

Candidature

CV, lettre de candidature, relevés de notes de M1-M2 (ou équivalent), intitulé du stage de recherche de fin d'étude et contacts de référents éventuels sont à envoyer à :

Baptiste Bergeot (baptiste.bergeot@insa-cvl.fr).

Date de démarrage de la thèse : 1er octobre 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. 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.
4. 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.
5. Bergeot, B., S. Terrien, & C. Vergez. *Rate-induced tipping in a dry-friction oscillator under parameter drift*. Paper presented at EURODINAME III - International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics, 8–11 June 2026, Giens (FR).
6. Gilbert, J., S. Maugeais, & C. Vergez (2020). *Minimal Blowing Pressure Allowing Periodic Oscillations in a Simplified Reed Musical Instrument Model: Bouasse-Benade Prescription Assessed through Numerical Continuation*. Acta Acust. 4(12).