

Continuation expérimentale

Développement de méthodes innovantes pour la caractérisation expérimentale des régimes et des bifurcations de systèmes dynamiques non linéaires - Cas de la voix

Direction de thèse :	Christophe Vergez (vergez@lma.cnrs-mrs.fr) Bruno Cochelin (bruno.cochelin@centrale-marseille.fr) Fabrice Silva (silva@lma.cnrs-mrs.fr)	Directeur de Recherche CNRS Professeur Centrale Méditerranée Chargé de Recherche CNRS
Laboratoire :	Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique Technopole Chateau-Gombert 4 impasse Nikola Tesla, CS40006, Marseille 13e	
Contrat :	Contrat doctoral CNRS, rémunération brute de 2135€ Possibilité de mission complémentaire d'enseignement à l'École Centrale Méditerranée	
Collaboration :	Soizic Terrien (Chargée de Recherche CNRS, LAUM, Le Mans) Thomas Hélie (Directeur de Recherche CNRS, IRCAM, Paris)	
Mots clés :	Systèmes dynamiques non linéaires, automatique, acoustique, voix	

Contexte général - Projet AVATARS

Le projet de thèse s'inscrit dans le cadre du projet de recherche AVATARS financé par l'Agence Nationale de la Recherche. Il s'intéresse à la production de la voix dans l'appareil vocal humain, et notamment à la diversité des régimes d'oscillations et à leur contrôle à des fins de communication ou d'expressivité artistique.

L'approche proposée par le projet AVATARS repose sur la **modélisation biomécanique de l'appareil vocal** et sa reproduction sous la forme d'**avatars numériques et mécatroniques**. Il vise notamment à progressivement intégrer dans les modèles la complexité des comportements des tissus biologiques qui constituent les plis vocaux, ainsi que celle des écoulements et des ondes acoustiques dans le larynx et le conduit vocal. Les modèles résultants sont exprimés sous forme de systèmes Hamiltoniens à ports, formalisme de représentation des modèles qui a émergé récemment à la croisée de l'automatique, de la mécanique et des systèmes dynamiques non linéaires. Cette approche présente l'avantage de fournir des outils pour le contrôle d'avatars mécatroniques. Le projet AVATARS réunira en effet de manière complémentaire et inédite trois bancs d'expérimentation dédiés à la voix : le banc larynx excisés animé développé entre le LMA, le LPL (Aix-en-Provence) et le CHU Liège (Belgique); des maquettes réalisées à partir de moulages de larynx entre l'IRCAM et le CHU Liège permettant une meilleure reproductibilité en contrepartie de tissus synthétiques simplifiés; et enfin un banc de test des matériaux biomimétiques conçus et réalisé au GIPSA-lab et au 3SR (Grenoble).

Contexte scientifique de la thèse

Le sujet de thèse proposé se focalise sur l'**analyse des régimes et des bifurcations** des avatars, deux notions qui sont détaillées ci-dessous.

Modèles numériques de la production du son et dispositifs expérimentaux présentent la faculté de pouvoir produire différents types de solutions, ou régimes : statique (silence, respiration), périodique (voix normale), quasi-périodique voire chaotique (voix criées et pathologiques). Pour que ces avatars puissent être exploitables en tant qu'outils d'aide à la décision (pour la communauté clinique) ou de création (pour la communauté artistique), il est nécessaire de fournir un manuel utilisateur des avatars, autrement dit d'être en mesure de pouvoir prédire les conditions de production de ces régimes : quelle trajectoire pour les paramètres de contrôle permet de produire un registre vocal (voix de poitrine ou de tête), une fréquence fondamentale, ou un timbre donné? L'établissement d'un diagramme de bifurcation permet d'apporter des réponses.

Un **diagramme de bifurcation** permet de représenter différents types de solutions d'un système dynamique en fonction d'un ou de plusieurs paramètres d'intérêt. C'est un outil traditionnel en dynamique non linéaire des systèmes. Lorsqu'on s'intéresse à la production de sons voisés, le diagramme de bifurcation regroupe

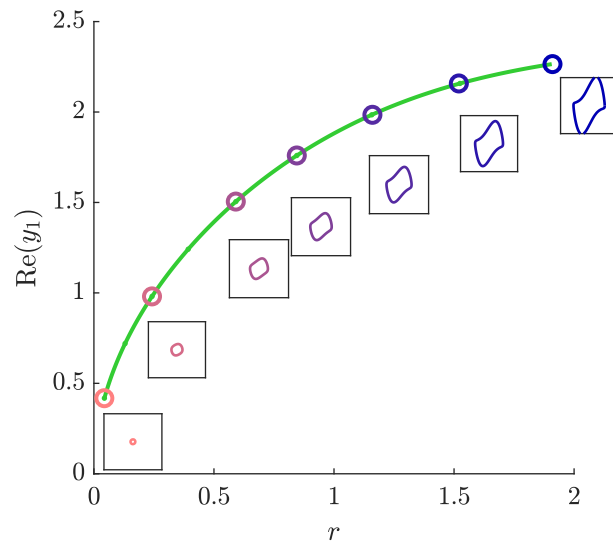


FIGURE 1 – Illustration du concept de diagramme de bifurcation sur un système très simple, l’oscillateur de Van der Pol, considéré comme un modèle minimal de la vocalisation ou de la production du son par les instruments de musique à vent et à cordes frottées. La courbe verte représente la branche de solutions périodiques, et on trace l’amplitude de la solution en fonction d’un des paramètres de l’oscillateur. En quelques points de la branche, on illustre la distorsion de la forme de la solution périodique quand r augmente en traçant le diagramme de phase.

les solutions asymptotiques (régimes établis) en fonction d’un paramètre lié à la morphologie du chanteur ou au contrôle qu’il exerce lors de la vocalisation (pression sub-glottique, tension des plis vocaux, etc). Ainsi solutions d’équilibre, régimes périodiques ou non périodiques sont-ils représentés graphiquement par une grandeur caractéristique (amplitude, fréquence, etc) pour chaque valeur du paramètre considéré. Cette grandeur caractéristique dépend de la valeur du paramètre et décrit ainsi une ou plusieurs **branches de solutions** dans le diagramme de bifurcation. La figure 1 illustre le concept de diagramme de bifurcation avec un exemple très simple : l’amplitude de la solution périodique d’un oscillateur de Van der Pol lorsqu’un des paramètres de l’oscillateur varie. La branche des solutions périodiques est tracée en vert, et en quelques points de la branche, on illustre l’enrichissement fréquentiel de la solution périodique en traçant le diagramme de phase de la solution.

L’avantage principal du diagramme de bifurcation est de représenter un résumé global des comportements possibles d’un système dynamique. Pour la voix, on y lit par exemple les conditions requises pour qu’il y ait production du son, les différentes notes possiblement émises, des informations sur la justesse, etc. A ce titre, et pour faire référence à une expression utilisée ci-avant, le diagramme de bifurcation peut effectivement s’envisager comme un “manuel utilisateur” du système dynamique. Une autre information importante est la stabilité de chaque solution. Une solution est stable si et seulement si elle persiste après une petite perturbation. On peut dire qu’une solution stable est robuste aux aléas (inévitables en pratique) alors qu’une solution instable ne peut pas être observée sur un temps arbitrairement long. La stabilité d’une solution peut être représentée sur le diagramme de bifurcation. Pour construire un diagramme de bifurcation à partir d’un modèle, le Laboratoire de Mécanique et d’Acoustique a développé un savoir-faire reconnu internationalement sur les méthodes de **continuation numérique des branches de solutions**. Les développements théoriques établis lors des thèses successives encadrées par Bruno Cochelin et Christophe Vergez (R. Arquier 2007, S. Karkar 2012 [1], P. Vigué 2017, L. Guillot 2020 [2]) ont donné lieu à une mise en œuvre numérique dans le logiciel [Manlab](#) [3] et déjà largement utilisée dans l’étude de structures mécaniques ou d’instruments de musique (cf Ref. [4] pour le cas de la trompette et Ref. [5] pour le saxophone).

Un des principaux enjeux de la thèse est d’avancer sur les fondements de la continuation expérimentale, transposition du concept de continuation numérique au cas des systèmes matériels [6]. Il s’agit ainsi de pouvoir estimer expérimentalement les diagrammes de bifurcation d’un système réel, de déterminer les différents régimes sonores, de pouvoir suivre de manière contrôlée les branches d’états d’équilibre, de cycles limites, voire de solutions quasi-périodiques.

Eventail détaillé des travaux envisagés

Une première étape de la thèse proposée est d'analyser des modèles numériques de l'appareil vocal avec des méthodes de continuation numérique, pour établir leur diagramme de bifurcation. Il s'agit également de se familiariser avec les concepts et outils.

On cherchera ensuite à analyser d'un point de vue fondamental comment il est possible de tirer parti de la structure des systèmes Hamiltoniens à ports dans la continuation numérique. En effet, le formalisme Hamiltonien à ports s'appuie sur une séparation forte entre les lois de comportement de composants et les chemins par lesquels peut transiter la puissance entre composants. Il en résulte une structuration intrinsèque des modèles qui garantit un bilan de puissance équilibré, avec des conséquences potentiellement intéressantes pour la continuation numérique.

Un second volet de la thèse portera sur l'adaptation du principe de continuation au cas de l'analyse des régimes et bifurcations de dispositifs expérimentaux, en l'occurrence les maquettes de l'appareil vocal dans le cadre du projet AVATARS. On pourra, dans un premier temps, adapter les techniques utilisées sur les instruments de type cuivre [7] pour cartographier les régimes sonores produit par les avatars. Face au grand nombre de paramètres de contrôle possibles (pression subglottique, distance entre plis vocaux, épaisseur et tension des plis, résistance aérodynamique et résonances du conduit vocal, etc...), on pourra se focaliser sur la recherche des frontières entre régimes en s'appuyant sur des méthodes comme l'*Explicit Design Space Decomposition* déjà mise en œuvre sur la physique du saxophone [8].

D'autre part, un des principaux enjeux de la thèse est d'avancer sur les fondements de la **continuation expérimentale**, transposition du concept de continuation numérique au cas des systèmes matériels [6]. Il s'agit ainsi de pouvoir estimer expérimentalement les diagrammes de bifurcation d'un système réel, de déterminer les différents régimes sonores (stables et instables), de pouvoir suivre de manière contrôlée les branches d'états d'équilibre, de cycles limites, voire de solutions quasi-périodiques.

Les travaux proposés visent à étendre aux systèmes auto-oscillants les avancées récentes obtenues pour les systèmes non linéaires forcés par les groupes de J. Sieber (Univ. Exeter), B. Krauskopf (Univ. Auckland) ou encore D. Barton (Univ. Bristol) qui ont mis en œuvre des techniques de stabilisation par rétroaction de la réponse du système (*Control-based Continuation*, CBC) ou de son déphasage (via une boucle à verrouillage de phase [10]), ce qui permet de reconstruire les courbes de réponse en fréquence (FRF) y compris à fort niveau. L'enjeu de ces méthodes consiste à déterminer la consigne qui rende le contrôleur transparent, c'est-à-dire qu'il ne modifie pas la dynamique du système que l'on souhaite caractériser. Une première communication par Lee *et coll* [11] met en lumière une difficulté supplémentaire pour les systèmes auto-oscillants pour lesquels l'amplitude mais aussi la fréquence des cycles limites sont à déterminer.

Au LMA, une première approche a notamment été réalisée en 2009 lors de la thèse au LMA de F. Silva sur les bifurcations des instruments à anche simple [12]. Il s'agissait alors de contrôler l'amplitude des oscillations produites dans une bouche artificielle. L'approche alors choisie consistait en un double asservissement : une boucle interne avec rétroaction sur la pression d'alimentation (pression buccale), et une boucle externe avec régulateur sur l'amplitude des oscillations acoustiques. Ce dispositif a permis de suivre expérimentalement une partie des branches de solutions périodiques, avec toutefois des bifurcations non souhaitées qu'il convient désormais de maîtriser.

L'approche de modélisation retenue dans le projet AVATARS présente l'avantage de fournir des outils d'intérêt pour le contrôle des avatars mécatroniques, comme des fonctions de contrôle-Lyapunov ou encore les méthodes de remodelage du Hamiltonien (méthode *Interconnection and Damping Assignment - Passivity Based Control*), ce qui d'envisager la **conception de contrôleurs de haut-niveau**. Ceci pourrait constituer un pas important vers la mise en œuvre de la continuation expérimentale.

Compétences souhaitées

- Automatique
- Traitement du signal
- Notions de systèmes dynamiques non linéaires (points équilibre, cycles limites, stabilité, attracteurs, bifurcations)
- Notions d'acoustique et plus généralement de physique des ondes (réponse en fréquence, ondes propagatives, modes)

Références

- [1] S. Karkar, *Méthodes numériques pour les systèmes dynamiques non linéaires : application aux instruments de musique auto-oscillants*. Thèse de doctorat d'Aix-Marseille Université, 2012.
- [2] L. Guillot, *De l'intérêt d'un formalisme quadratique pour la continuation des solutions d'un système dynamique et de leurs bifurcations : applications aux instruments à anche*. Thèse de doctorat d'Aix-Marseille Université, 2020.
- [3] Toolbox MANLAB, <http://manlab.lma.cnrs-mrs.fr/>.
- [4] V. Fréour, L. Guillot, H. Masuda, S. Usa, E. Tominaga, Y. Tohgi, C. Vergez & B. Cochelin, *Numerical continuation of a physical model of brass instruments : Application to trumpet comparisons*. J. Acous. Soc. Am. 148(2), p.748-758, 2020.
- [5] T. Colinot, L. Guillot, C. Vergez, P. Guillemain, J.B. Doc, B. Cochelin, *Influence of the "GhostReed" Simplification on the Bifurcation Diagram of a Saxophone Model*, Acta Acustica united with Acustica, Hirzel Verlag, 105 (6), p.1291-1294, 2019, <https://doi.org/10.3813/AAA.919409>
- [6] J. Sieber, B. Krauskopf, *Control-Based Continuation of Periodic Orbits with a Time-Delayed Difference Scheme*, International Journal of Bifurcation and Chaos 17(8), p.2579-2593, 2007.
- [7] N. Lopes, *Approche passive pour la modélisation, la simulation et l'étude d'un banc de test robotisé pour les instruments de type cuivre*. Thèse de doctorat de l'Université Paris 6, 2016.
- [8] J.-B. Doc, C. Vergez, S. Missoum. *A Minimal Model of a Single-Reed Instrument Producing Quasi-Periodic Sounds*, Acta Acustica united with Acustica 100, p.543-554, 2014
- [9] V. Denis, M. Jossic, C. Giraud-Audine, B. Chomette, A. Renault, O. Thomas, *Identification of nonlinear modes using phase-locked-loop experimental continuation and normal form*, Mechanical Systems and Signal Processing 106, p.430-452, 2018.
- [10] V. Denis, M. Jossic, C. Giraud-Audine, B. Chomette, A. Renault, O. Thomas, *Identification of nonlinear modes using phase-locked-loop experimental continuation and normal form*, Mechanical Systems and Signal Processing 106, p.430-452, 2018.
- [11] K.H. Lee, D. Barton & L. Renson, *Experimental bifurcation analysis of a self-excited system exhibiting a subcritical Hopf bifurcation using control-based continuation*, Proc. ENOC 2022, Lyon.
- [12] F. Silva, *Émergence des auto-oscillations dans un instrument de musique à anche simple*. Thèse de doctorat d'Aix-Marseille Université, 2009.