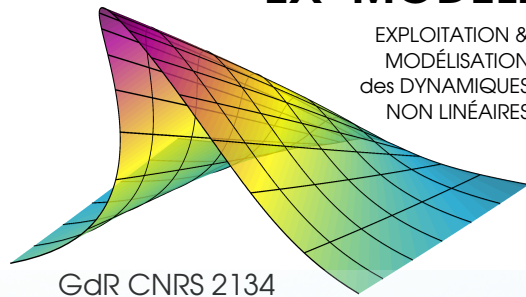


EX-MODELI

EXPLOITATION &
MODÉLISATION
des DYNAMIQUES
NON LINÉAIRES



Journées annuelles du Groupement de Recherche **EX-MODELI**

16 - 17 octobre 2025
ENSAM Lille

PROGRAMME DES JOURNEES

Le Groupement de Recherche EX-MODELI a pour missions de fédérer et d'animer les activités de la communauté française en dynamique non linéaire dans le but de renforcer les coopérations, de favoriser les échanges et la création de nouveaux projets, de pousser à l'émergence de nouvelles idées, de former les jeunes scientifiques et de conforter la place centrale de la communauté française dans le paysage international. Le GdR se structure autour de l'idée principale de comprendre et maîtriser les non-linéarités afin de créer de nouvelles fonctionnalités (transfert d'énergie, contrôle vibratoire, ...). Ceci implique des développements poussés sur les aspects de modélisation en s'intéressant notamment aux couplages multi-physiques (piézoélectricité, électromagnétisme, interaction fluide-structure, ...) et au développement de méthodes numériques et expérimentales avancées pour l'analyse de ces systèmes mécaniques non-linéaires. En utilisant les partenariats forts existants avec la recherche aval, le but du GdR est aussi de favoriser le transfert des nouvelles idées vers les applications industrielles en favorisant la mise en application rapide des méthodes et outils développés vers les secteurs concernés (aéronautique, génie civil, production d'énergie, systèmes micro-électro-mécaniques MEMS).

Le GdR bénéficie du soutien du CNRS depuis Janvier 2023, et se situe dans la continuité du GdR DYNOLIN (2011-2014, 2015-2018). Il est rattaché à l'Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes, INSIS, et plus particulièrement à la section 09.

Les porteurs du GdR

Emeline SADOULET-REBOUL (UFC FEMTO-ST)
Enora DENIMAL GOY (INRIA Saclay)
Olivier THOMAS (ENSAM LISPEN)
Cyril TOUZÉ (ENSTA Paris - IMSIA).

Programme

16 octobre 2025	6
9:30 - 10:00 : Accueil et présentation des journées	6
10:00 - 11:00 : Suivi numérique de bifurcations, S. Baguet (INSA Lyon)	6
11:00 - 12:15 : Méthodes de continuation expérimentale et localisation d'isolats, C. Bertrand et A. Grolet (ENSAM Lille)	6
12:30 - 14:00 : Pause déjeuner	6
14:00 - 15:15 : Surrogate modeling for nonlinear dynamics, E. Denimal Goy (INRIA), E. Sadoulet-Reboul (FEMTO-ST)	6
15:15 - 16:15 : Mesures des vibrations non linéaires par caméras, S. Lo Feudo (ISAE-Supméca)	7
16:15 - 16:45 : Pause café	7
16:45 - 17:30 : Identification des non-linéarités dans les essais de vibrations au sol des aéronefs, C. Stephan (ONERA)	7
17 octobre 2025	8
9:00 - 10:00 : Conférence plénière: Simulations vibratoires non linéaires au service de la dissuasion nucléaire, M. Claeys et S. Talik, CEA CESTA	8
10:00 - 10:45 : Pause café	8
10:00 - 11:00 : Session 1: Numérique (Chair : O. Thomas)	8
10h45-11h00 : Reduced order modelling for shell finite element structures using the direct parametrisation of invariant manifolds, Z. Xia	8
11h00-11h15: Limites de validité pour la méthode de paramétrisation de variétés invariantes : critères pratiques pour les systèmes vibrants, A. de Figueiredo Stabile	8
11h15-11h30: Automatisation de la méthode des échelles multiples : outil d'analyse analytique de systèmes non-linéaires, V. Mahé	9
11h30-11h45: Analyse lente-rapide de l'atténuation d'une résonance mécanique par un NES bistable, A. Couineaux	9
11h45-12h00: Simulation numérique et analyse de la dynamique non-lisse d'une poutre visco-élastique impactant des butées	10
12h-12h15: Résonateurs opto-mécaniques en régime chaotique pour la communication cryptée, R. Alcorta Galvan	10
12:30 - 14:00 : Pause déjeuner	11
14:00 - 15:00 : Session 2 (Chair : B. Bergeot)	11
14h-14h15: Étude analytique et expérimentale de membranes minces hyperélastiques : application aux puits d'énergie non linéaire pour l'atténuation des forts niveaux acoustiques, R. Moussa	11
14h15-14h30: Écoulement induit par une membrane vibrant en déformation extrême, P-O. Mattei.	11

14h30-14h45: Les sauts de registres de la clarinette: exploration numérique et expérimentale des bassins d'attractions et mise en évidence de phase-tipping, N. Szwarcberg.	12
14h45-15h00: Identification de paramètres et caractérisation de comportements attractifs et dissipatifs par analyse de résonances non-linéaires en microscopie à force atomique, A. Givois	12
15:00 - 15:15 - Pause	13
15:15 - 16:00 - Session 3 (Chair : E. Sadoulet-Reboul)	13
15h15-15h30: Méthode de continuation expérimentale (Control-based Continuation) pour l'étude des auto-oscillations vibro-acoustiques d'instruments de musique à vent ou de la voix, R. Caron.	13
15h30-15h45: Vers la continuation expérimentale de point de bifurcation de Folds, E. Gourc	13
15h45-16h00: A model- and derivative-free arclength continuation method for tracing bifurcation diagrams in nonlinear systems, A. Spits	14

Quelques informations pratiques



La grande place de Lille



La cour des Arts et Métiers de Lille

Conférence

Les journées annuelles du GDR EX-MODELI ont lieu les 16 et 17 octobre 2025 à l'École Nationale Supérieure des Arts et Métiers (ENSAM) de Lille. L'entrée du site est au 8 boulevard Louis XIV, dans le centre de Lille. Les conférences se dérouleront dans l'amphithéâtre Henri Tresca, au centre du bâtiment principal. Un plan d'accès est donné sur la page suivante.

Repas du midi

Les repas seront pris dans le bâtiment "la centrale", situé au centre de la cour des ateliers.

Accès WIFI

L'accès se fait avec EDUROAM.

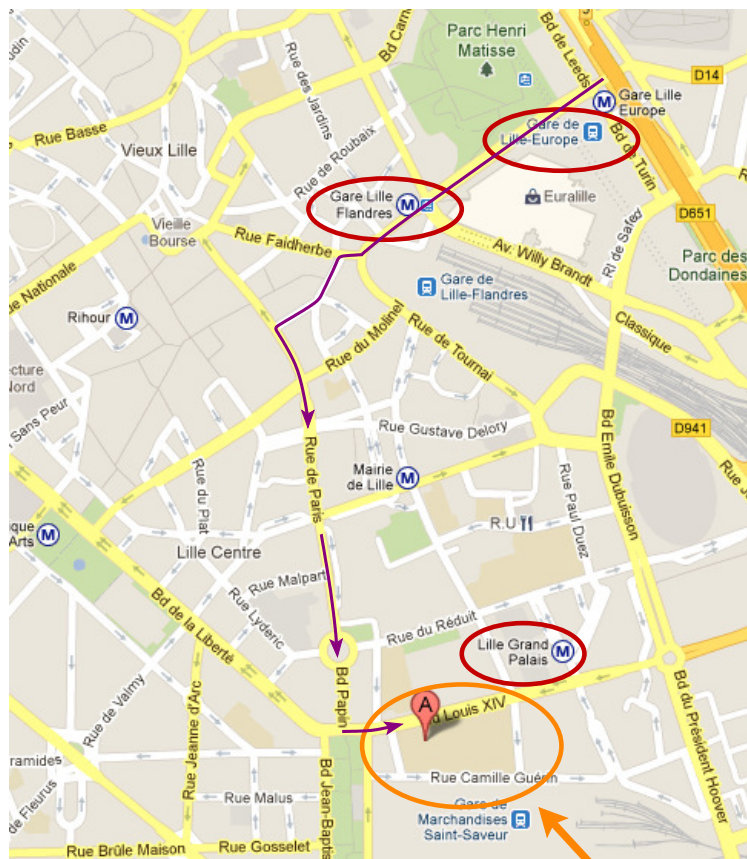
Repas du jeudi soir

Le repas du jeudi soir aura lieu à partir de 20h30 à l'estaminet "la cour de la cht'ite Brigitte", 61 Rue de la Monnaie, 59800 Lille.



la cour de la cht'ite Brigitte

The Lille campus of Arts et Métiers ParisTech is located in the city center
two metro stops from the SNCF train stations Lille Flandres and Lille Europe and at 17 minutes walk



8 bd. Louis XIV

59046 Lille

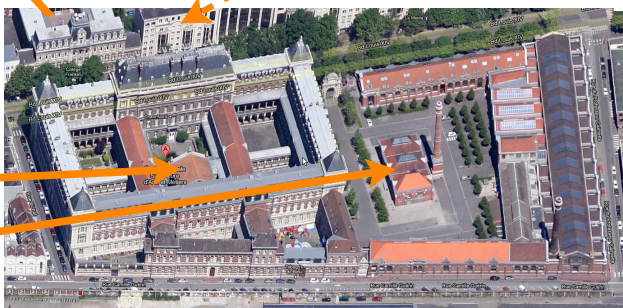
<http://www.lille.ensam.fr>



-  Metro and train stations
-  Itinerary by walk

TRESCA amphitheater

"La Centrale"



Plan d'accès

16 octobre 2025 — Cours doctoraux

Cette première journée du GDR Ex-Modeli est consacrée à des cours doctoraux couvrant les différents thèmes du GDR.

9:30 - 10:00 : Accueil et présentation des journées

10:00 - 11:00 : Suivi numérique de bifurcations, S. Baguet (INSA Lyon)

Si la continuation numérique des courbes de réponse en fréquence peut désormais être considérée comme un outil classique en dynamique non linéaire, la localisation et le suivi des bifurcations restent encore une affaire d'experts. Le calcul des bifurcations est toutefois essentiel car elles interviennent dans la majorité des phénomènes non linéaires et leur classification détermine la dangerosité des effets indésirables associés. Après un aperçu des phénomènes indésirables en dynamique non linéaire et des bifurcations susceptibles de se produire, cet exposé se focalisera sur le calcul numérique et le suivi paramétrique des bifurcations. Les applications traitées montreront que le suivi des bifurcations est un outil très puissant pour définir la dynamique d'ensemble d'un système dynamique et les frontières d'existence de certains phénomènes, pour trouver les jeux de paramètres qui éliminent les effets indésirables, ou encore pour optimiser les performances. Enfin, nous verrons comment l'analyse des bifurcations permet de mettre au point des stratégies exploitant avantageusement les phénomènes non linéaires.

11:00 - 12:15 : Méthodes de continuation expérimentale et localisation d'isolas, C. Bertrand et A. Grolet (ENSAM Lille)

Le cours sera composé de deux parties. (i) Dans la première partie, après avoir rapidement introduit les notions de bases permettant l'étude dynamique des systèmes linéaires, le cours élargira ces notions aux cas non linéaires en commençant par donner des concepts clés. Puis des méthodes de résolution analytique appliquées au cas de l'oscillateur de Duffing seront présentées pour illustrer ces nouveaux concepts (modes non linéaires, stabilité, bifurcations, ...). Enfin on élargira en considérant le cas de systèmes symétriques, où on illustrera le phénomène de localisation. (ii) Dans la deuxième partie, on présente le concept de résonance de phase et son utilisation comme un outil pratique pour mesurer les modes non linéaires et les réponses forcées. Une ouverture sur l'utilisation de la boucle à verrouillage de phase pour mesurer une solution isolée d'un système symétrique sera faite comme conclusion à ce cours.

12:30 - 14:00 : Pause déjeuner

14:00 - 15:15 : Surrogate modeling for nonlinear dynamics, E. Denimal Goy (INRIA), E. Sadoulet-Reboul (FEMTO-ST)

Les coûts numériques associés aux codes de calcul pour le calcul des réponses dynamiques des structures peuvent devenir particulièrement lourds pour des modèles de grande taille. Dans ce contexte, les méthodes de méta-modélisation s'avèrent particulièrement pertinentes pour réduire drastiquement ces coûts. Cette présentation dresse un panorama rapide des méthodes les plus classiques puis présente deux cas d'application exploitant les NARX et les processus Gaussiens pour de la prédiction ou de l'optimisation structurelle dans des contextes de dynamique non linéaire.

15:15 - 16:15 : Mesures des vibrations non linéaires par caméras, S. Lo Feudo (ISAE-Supméca)

La mesure par caméras est une technique particulièrement adaptée à l'étude des systèmes non linéaires, car elle permet d'obtenir des données sans contact et de manière multipoint, ce qui est essentiel pour capturer les réponses complexes et localisées des structures.

Cependant, la réalisation de mesures de vibrations par méthodes optiques implique de surmonter plusieurs défis pratiques et techniques. Il s'agit notamment de déterminer les déplacements mesurables et la résolution en fréquence, de sélectionner les optiques appropriées et de positionner correctement les caméras, d'assurer des conditions d'éclairage adéquates et de choisir des traitements de surface efficaces pour le post-traitement des images.

Cette présentation décrit le processus de mesure des vibrations à l'aide de caméras, à partir de la préparation aux essais dynamiques jusqu'au traitement des images et à l'analyse préliminaire des résultats. Comme étude de cas, nous nous concentrerons sur une campagne expérimentale réalisée dans le cadre du projet ERIES – ALL4WaLL, sur la table vibrante du LNEC à Lisbonne, où un mur en béton armé de forme U a été soumis à une excitation sismique. En outre, le logiciel open source VibrationTracker sera présenté. Cet outil permet de mesurer les vibrations en 2D et 3D à partir des images, avec des modules pour la calibration, la détection et le suivi des cibles, ainsi que pour la mesure des champs à l'aide de la corrélation d'images numériques.

16:15 - 16:45 : Pause café

16:45 - 17:30 : Identification des non-linéarités dans les essais de vibrations au sol des aéronefs, C. Stephan (ONERA)

Lors d'un programme de nouvel aéronef, les essais de vibrations au sol (GVT pour *Ground Vibration Testing*) représentent une étape clé du processus de certification. Le GVT permet de réaliser l'identification du comportement dynamique d'une structure hors vent, et fournit un modèle expérimental de celui-ci sous forme d'une base modale, comportant les paramètres (fréquence, amortissement, déformée, masse modale) des principaux modes de vibrations à différents niveaux d'énergie. La taille et la complexité d'un aéronef impliquent que les moyens techniques et humains requis sont très conséquents. De plus, certains composants, tels que les gouvernes ou les atterrisseurs, présentent des comportements non linéaires à un degré tel qu'ils peuvent influencer notablement la dynamique de la structure complète. Les méthodes d'essais doivent donc être adaptées à l'identification des non-linéarités, afin de fournir les informations utiles pour les modèles, que ce soit au niveau des moyens d'essais (instrumentation, systèmes d'excitation) ou des méthodes de traitement des données.

17 octobre 2025

9:00 - 10:00 : Conférence plénière: Simulations vibratoires non linéaires au service de la dissuasion nucléaire, M. Claeys et S. Talik, CEA CESTA

La Direction des Applications Militaire (DAM) du CEA est responsable, de la conception jusqu'à la livraison aux armées, des armes de dissuasion françaises. Les Têtes Nucléaires Océaniques sont embarquées sur des missiles balistiques de longue portée et doivent pouvoir rester intègres et fonctionnelles au cours d'une mission opérationnelle. Cette mission génère de très forts niveaux vibratoires. Depuis une vingtaine d'années, le CEA/DAM cherche à garantir la tenue des têtes nucléaires à ces environnements vibratoires par simulations, validées par des essais. Les essais faisant apparaître des phénomènes vibratoires non linéaires, le CEA a lancé en 2012 un programme de recherche et développement pour simuler ces réponses vibratoires non linéaires, en partenariat avec l'École Centrale de Lyon. Cet exposé présentera ces travaux, dans le contexte industriel du CEA/DAM.

10:00 - 10:45 : Pause café

10:45 - 12:30 : Session 1: Numérique (Chair : O. Thomas)

Reduced order modelling for shell finite element structures using the direct parametrisation of invariant manifolds

10:45

Z. Xia (LMEE), C. Touzé (ENSTA), Y. Cong (LMEE)

The accurate simulation of the nonlinear dynamics of thin-walled structures is a critical but computationally demanding task. In this contribution, a 7-parameter solid-shell finite element formulation is combined with the direct parametrisation method for invariant manifolds (DPIM), in order to derive accurate and efficient reduced-order models (ROM) accounting for geometric nonlinearity. The method is illustrated in its ability to be used with different yet complementary purposes. On the one hand, low-order tractable models can be obtained, providing simple ROMs that are amenable to giving physical insights and understanding. On the other hand, higher-order solutions are available within the same framework, hence providing accurate and converged solutions. This scheme is carried out on examples with increasing complexity. First, the transition from hardening to softening behaviour for thin shells with shape imperfections is investigated. The 1:2 resonance as a driver of the change of type of nonlinearity is analysed, and a full understanding of the smooth transition is illustrated. Then, shells with varying thicknesses are investigated, and the case of 1:2 internal resonance is further investigated, showing the emergence of isolated solution branches (isola). In the course of the numerical simulations, it is shown how the reduced basis needs to be enlarged to take into account more and more complex resonance scenarios, and some guidelines are provided in order to help the analyst in selecting the master modes. The numerical results highlight the ability of the reduced-order models to provide a fully comprehensive and integrated framework for the understanding and accurate prediction of thin shells' nonlinear dynamics.

Limites de validité pour la méthode de paramétrisation de variétés invariantes : critères pratiques pour les systèmes vibrants**11:00**

A. de Figueiredo Stabile (ENSTA), A. Grolet (ENSAM), A. Vizzacarro (Univ. Exeter), C. Touzé (ENSTA)

La méthode de paramétrisation de variétés invariantes est une technique de réduction de modèle fondée sur des développements asymptotiques autour d'un point fixe d'un système dynamique. Les avancées des dernières années ont permis son application efficace à des systèmes mécaniques de grande dimension, en particulier ceux discrétisés par la méthode des éléments finis, jusqu'à des ordres polynomiaux élevés. Toutefois, comme toute technique locale, la méthode possède un rayon de convergence qui définit l'amplitude maximale jusqu'à laquelle elle peut être appliquée. Dans cette contribution, nous revisitons et élargissons quelques critères proposés dans la littérature afin d'estimer la limite de validité de la méthode, l'objectif principal étant de proposer une méthode effective permettant de déterminer rapidement la zone de convergence pour des problèmes éléments finis. Trois critères distincts sont étudiés : le premier prend en compte l'erreur de l'équation d'invariance ; le deuxième cherche des singularités dans l'opérateur homologique, et s'inspire d'un critère proposé pour les formes normales ; enfin, le troisième examine les séries de puissances issues de la méthode au moyen de critères de convergence bien établis. Nous testons ces différents critères sur des exemples de complexité croissante et proposons une procédure pratique destinée à l'analyse des systèmes mécaniques vibrants.

Automatisation de la méthode des échelles multiples : outil d'analyse analytique de systèmes nonlinéaires**11:15**

V. Mahé (GEM)

L'analyse de systèmes dynamiques non linéaires peut se faire par des approches expérimentales, numériques et analytiques. Ces dernières présentent des avantages majeurs pour traiter des systèmes à quelques degrés de liberté, typiquement issus de modèles simplifiés. En effet elles facilitent grandement les études paramétriques, permettent une compréhension profonde du système, peuvent mener à des règles de dimensionnement simples, et présentent un temps de calcul par simulation presque nul. L'utilisation d'approches analytiques est toutefois freinée par la complexité des méthodes de résolution ainsi que la lourdeur des calculs impliqués. Un outil de résolution automatique a été développé en calcul formel pour rendre accessible ces approches. Il est codé en Python, disponible sur GitHub et se base sur la Méthode des Echelles Multiples. Cet outil permet la résolution en régimes libre et forcé de systèmes de quelques degrés de liberté faiblement couplés et faiblement nonlinéaires, ainsi que l'évaluation de leur stabilité dynamique. Le gain de temps sur des oscillateurs complexes est très élevé, en passant de quelques jours ou semaines de calcul à quelques secondes ou minutes.

Analyse lente-rapide de l'atténuation d'une résonance mécanique par un NES bistable

11:30

A. Couineaux (INSA CVL), B. Bergeot (INSA CVL)

Dans le contexte de la transition écologique, les sources d'énergie renouvelables comme les éoliennes sont devenues incontournables. Cependant, ces dernières peuvent subir des vibrations structurelles nuisibles. En effet, le secteur éolien utilise des rotors de plus en plus grands pour capter plus d'énergie et réduire les coûts. Cela rend les pales nettement plus flexibles, les exposant davantage aux vibrations de grande amplitude ainsi qu'à la fatigue vibratoire, ce qui peut considérablement réduire leur durée de vie. Un enjeu scientifique, économique et industriel réside donc en la conception de dispositifs permettant d'atténuer ces vibrations. Parmi les dispositifs passifs, les absorbeurs dynamiques non linéaires de type NES (Nonlinear Energy Sink) [1] peuvent être mis en place. Ils possèdent la capacité d'absorber l'énergie vibratoire sur une large gamme de fréquences par un phénomène dit de pompage énergétique. En particulier, par rapport au NES classiques, les NES bistables (BNES) présentent une meilleure capacité à atténuer des vibrations de faibles amplitudes.

Le comportement d'un système mécanique oscillant couplé à un BNES est extrêmement riche [2]. Par conséquent, afin de pouvoir mettre œuvre ce type d'absorbeur sur des systèmes complexes tels que les pâles des éoliennes, il est important de comprendre et d'identifier les mécanismes dynamiques sur des systèmes plus simples. Dans ce but, le modèle académique d'un oscillateur harmonique amorti forcé par une excitation sinusoïdale et couplé à un BNES est ici étudié. Des simulations numériques permettent dans un premier temps de recenser la grande diversité des régimes observés qui peuvent être périodiques, quasi-périodiques ou chaotiques. Dans un second temps et de façon originale, la méthode dite MSHBM (Multiple Scale/ Harmonic Balance Method) [3] est adaptée pour prendre compte la spécificité du BNES par rapport au NES classique. Cela conduit à un modèle simplifié appelé flot de modulation qui reproduit la grande variété de réponses du système initial. Enfin, une analyse dite lente-rapide du flot de modulation est effectuée permettant de comprendre l'apparition de ces régimes, voire d'en prédire l'existence.

[1] Vakakis, A. F., O. V. Gendelman, L. A. Bergman, D. M. McFarland, G. Kerschen, et Y. S. Lee. *Nonlinear Targeted Energy Transfer in Mechanical and Structural Systems*. Springer, 2009.

[2] Bergeot, B. et S. Berger. "Fast-Slow Analysis of Passive Mitigation of Self-Sustained Oscillations by Means of a Bistable Nonlinear Energy Sink". *Physica D: Nonlinear Phenomena* 460 (2024): 134063.

[3] Luongo, A. et D. Zulli. "Dynamic analysis of externally excited NES-controlled systems via a mixed Multiple Scale/Harmonic Balance algorithm". *Nonlinear Dynamics* 70 (2012): 2049-2061.

Simulation numérique et analyse de la dynamique non-lisse d'une poutre visco-élastique impactant des butées

11:45

A. Khaddari (INSA Lyon - Framatome), R. Alcorta (INSA Lyon), C. Grenat (Framatome), C. Pozzolini (Framatome), V. Lleras (IMAG - Université de Montpellier), Y. Renard (INSA Lyon)

Cette présentation porte sur la modélisation et l'analyse de la dynamique d'une poutre viscoélastique en interaction avec des obstacles rigides. Le système est soumis à des conditions de contact unilatéral de type Signorini, qui imposent une non-pénétration et des forces de réaction en cas de contact. Ces contraintes introduisent une forte non-linéarité dans le modèle. L'étude met en évidence des phénomènes de perte de stabilité et de bifurcations : sous certaines conditions que ce soit avec des paramètres physiques ou des paramètres du modèle, le système passe d'un état stable à des régimes dynamiques complexes, tels que des oscillations périodiques ou chaotiques.

Par ailleurs, l'étude s'intéresse à la distribution statistique des efforts de contact au niveau du nœud libre de la poutre. En fonction du régime dynamique, les forces de contact présentent des comportements très variés en fonction du temps. Une analyse statistique permet de relier ces distributions aux différentes dynamiques observées.

Ce travail contribue à mieux comprendre le comportement de structures flexibles avec contact rigide intermittent, en mettant en lumière les liens entre non-linéarité, bifurcation, et complexité statistique des interactions mécaniques.

Résonateurs opto-mécaniques en régime chaotique pour la communication cryptée
R. Alcorta Galván (CEA-Leti), M. Sansa (CEA-Leti), G. Jourdan (CEA-Leti), M. Defoort (TIMA-CDSI), B. Legrand (LAAS-MEMS)

12:00

Les systèmes chaotiques ont récemment suscité un intérêt pour leurs applications dans les capteurs et la communication sécurisée grâce à la cryptographie chaotique. Cette dernière est une forme de cryptographie matérielle où l'information est masquée par un signal chaotique avant transmission. Ce signal peut être récupéré via un résonateur en régime chaotique similaire à celui utilisé pour coder, par un processus appelé synchronisation chaotique, agissant ainsi comme une clé pour décrypter l'information. Les résonateurs MEMS et les lasers chaotiques ont été proposés comme générateurs de ces signaux. Les MEMS sont efficaces et compacts, tandis que les lasers présentent de larges bandes passantes et sont compatibles avec les infrastructures de communication optique. Pour combiner ces avantages, nous proposons une solution à base de résonateurs optomécaniques, à la fois facilement intégrables et compatibles avec les infrastructures optiques. Nous présenterons une analyse théorique de ces systèmes inhéremment non linéaires, qui présentent différents mécanismes pour atteindre des comportements chaotiques à basses et hautes fréquences, ainsi comme une nouvelle méthode pour générer des signaux chaotiques par modulation des paramètres du laser. Des premiers résultats expérimentaux permettent de valider nos modèles, ouvrant les portes aux premiers tests de cryptographie chaotique à base de résonateurs optomécaniques.

12:30 - 14:00 : Pause déjeuner

14:00 - 15:00 - Session 2: Analyse et modélisation de systèmes non linéaires - (Chair : B. Bergeot)

Étude analytique et expérimentale de membranes minces hyperélastiques : application aux puits d'énergie non linéaire pour l'atténuation des forts niveaux acoustiques

14:00

R. Moussa (UTC), A. Givois (UTC), N. Dauchez (UTC)

La réduction du bruit, notamment l'atténuation sur de larges gammes fréquentielles et plus particulièrement en basses fréquences, constitue un enjeu majeur pour la société. Cette étude propose l'utilisation des absorbeurs présentant une raideur régie par une loi non linéaire, offrant un avantage par rapport aux oscillateurs à masses accordées classiques.

Ces oscillateurs non linéaires, sont appelés puits d'énergie non linéaire ou NES (pour Nonlinear Energy Sinks). Lorsqu'un tel système est couplé à un système primaire (acoustique ou vibratoire) et soumis à un niveau d'excitation suffisant pour activer son comportement non linéaire, un transfert irréversible d'énergie se produit : l'énergie est transférée du système primaire vers l'absorbeur non linéaire, où elle est dissipée. Dans ce contexte, l'application des NES pour atténuer le mode acoustique d'un conduit est étudiée.

Le NES est constitué d'une fine membrane viscoélastique en caoutchouc qui, sous de forts niveaux d'excitation acoustique, vibre avec des déplacements importants, induisant des non-linéarités géométriques. Bien que le comportement de ces oscillateurs soit souvent décrit dans la littérature comme étant principalement cubique, les observations expérimentales ne confirment pas cette tendance. Cette étude vise à analyser non seulement la non-linéarité géométrique de l'oscillateur, mais également celle liée à l'hyperélasticité du matériau constituant cet oscillateur. Une limitation majeure de ces systèmes réside dans la nécessité de niveaux d'excitation élevés pour déclencher le transfert irréversible d'énergie. Ces travaux proposent une analyse paramétrique approfondie de la membrane (rayon, épaisseur, amortissement, etc.) dans le but d'optimiser le comportement du NES, de réduire le seuil d'activation et, enfin, de comparer ces résultats aux observations expérimentales.

Écoulement induit par une membrane vibrant en déformation extrême

P.-O. Mattei (LMA), R. Côte (LMA), L. Sabatier (LMA)

14:15

Ce travail concerne une série de résultats expérimentaux sur des vibrations en basse fréquence de membranes en grandes déformations. Ces membranes sont utilisées par exemple pour concevoir des absorbeurs non-linéaires vibroacoustiques. Nos précédents travaux [1] avaient montré que lorsque l'amplitude vibratoire de la membrane passait d'un mouvement à faible amplitude (ratio amplitude / épaisseur inférieur à 1) à un mouvement à forte amplitude (ratio amplitude/épaisseur supérieur à 30 ou 40), les paramètres d'un modèle simplifié de dissipation de membrane par viscosité linéaire et non-linéaire montraient une très forte augmentation lorsque la membrane se mettait à vibrer avec une très forte amplitude, augmentation dont l'origine nous était inconnue. Cette communication présente une série d'expériences qui a été menée afin d'étudier le comportement de telles membranes. Lors de l'étude du suivi des maxima de réponses vibratoires à la résonance en régime forcé par sinus balayés croissants et décroissants, il a été observé la présence de plusieurs "backbone curves" dépendants de la nature de la réponse vibratoire de la membrane. La membrane vibrait systématiquement sur son mode fondamental à déformée parabolique mais présentait des harmoniques purement axisymétriques ou des harmoniques non axisymétriques. Une mesure par PIV rapide au voisinage immédiat de la membrane a montré qu'un écoulement moyen significatif (de l'ordre de 1m/s) a été induit par celle-ci. Cet écoulement, qui pourrait expliquer la très forte augmentation apparente de la dissipation de la membrane, dépend fortement de la déformée vibratoire de la membrane et en particulier de la nature des harmoniques contenues dans le signal.

[1] I. Bouzid, R. Côte, T. Fakhfakh, M. Haddar and P.-O. Mattei. Identification of the parameters of a simplified 2 degree of freedom model of a nonlinear vibroacoustic absorber coupled to an acoustic system in linear and nonlinear forced regimes. *Acta Acustica*, 6 (2022), 60.

Les sauts de registres de la clarinette: exploration numérique et expérimentale des bassins d'attractions et mise en évidence de phase-tipping

N. Szwarcberg (Buffet Crampon, LMA), T. Colinot (Buffet Crampon), C. Vergez (LMA), M. Jousserand (Buffet Crampon)

14:30

Lorsqu'on joue de la clarinette, l'ouverture du trou de registre provoque le passage du premier au deuxième registre, produisant un intervalle de douzième. À l'aide d'un musicien artificiel, il est possible de déterminer la région de stabilité du deuxième registre en faisant varier progressivement la pression de souffle lorsque le trou est ouvert.

Cependant, si l'on ouvre le trou alors que l'instrument joue déjà dans le premier registre, la plage de pressions de souffle conduisant à une transition réussie est plus restreinte que la zone de stabilité complète du deuxième registre. Ce phénomène est étudié numériquement en ouvrant le trou à différents instants et en variant la pression de souffle.

Dans certaines régions de l'espace des paramètres de contrôle, le succès de la transition dépend de la phase à laquelle le trou est ouvert. Il s'agit d'un exemple de *phase tipping*, où le cycle limite du régime du trou fermé traverse différents bassins d'attraction liés aux régimes du trou ouvert.

Enfin, pour évaluer la robustesse de ces bassins d'attraction, un bruit aléatoire est ajouté aux paramètres de contrôle avant l'ouverture du trou. Les résultats montrent que le régime d'équilibre est plus robuste au bruit que les régimes oscillants.

Identification de paramètres et caractérisation de comportements attractifs et dissipatifs par analyse de résonances non-linéaires en microscopie à force atomique

14:45

A. Givois (UTC), P-E. Mazeran (UTC)

La microscopie à force atomique sollicitée en régime oscillant permet de sonder les propriétés de surfaces de matériaux à partir de la réponse non linéaire due au contact entre le levier du microscope et l'échantillon sondé. Cette réponse fait successivement apparaître un régime attractif puis répulsif, respectivement associés à un comportement assouplissant et raidissant. Ce travail aborde d'abord la comparaison entre réponses expérimentales et simulations issues de modèles simplifiés. Les contributions des termes dissipatifs et attractifs, ainsi que le caractère régulier de la fonction d'interaction, sont notamment discutées. L'étude se concentre ensuite sur une analyse des signaux expérimentaux et en particulier du contenu harmonique à haute fréquence du déplacement mesuré au levier. Cette analyse cherche à établir l'intérêt d'exploiter ce contenu à haute fréquence pour améliorer la fiabilité du recalage de paramètres matériaux lors de comparaisons entre essais et simulations.

15:00 - 15:15 - Pause

15:15 - 16:00 - Session 3: Méthodes expérimentales - (Chair : E. Sadoulet-Reboul)

Méthode de continuation expérimentale (Control-based Continuation) pour l'étude des auto-oscillations vibro-acoustiques d'instruments de musique à vent ou de la voix.

15:15

R. Caron (LMA), B. Cochelin (LMA), E. Gourc (LMA), F. Silva (LMA), C. Vergez (LMA)

Les instruments de musique à vent (comme la clarinette, les flûtes, les cuivres), à cordes frottées ou encore la voix font tous partie d'une plus large catégorie de systèmes dynamiques non linéaires présentant des régimes auto-oscillants. Dans le cas des instruments de la famille des cuivres et de la voix, les oscillations auto-entretenues reposent sur l'interaction par écoulement fluide entre un résonateur acoustique (la colonne d'air dans le conduit vocal et/ou l'instrument) et des lèvres (plis vocaux pour la voix, lèvres pour le musicien cuivriste). Pour une pression d'alimentation suffisamment élevée, l'équilibre statique (silencieux) devient instable pour laisser la place à des oscillations (sonores), par le biais d'une bifurcation de Hopf. Selon le niveau de participation des diverses résonances acoustiques et mécaniques, le diagramme de bifurcation peut s'avérer plus ou moins complexe, mettant possiblement en jeu un grand nombre de branches de régimes stables. Cette apparente complexité peut être dissipée si l'on s'intéresse aux régimes instables qui relient les différents régimes stables entre eux. Ces régimes, étant instables, ne peuvent être observés avec les méthodes expérimentales habituelles. Des techniques de contrôle issues de l'automatique couplées à des algorithmes de suivi de branche (continuation) sont nécessaires pour stabiliser les régimes instables et explorer la réponse du système. La Control-Based Continuation (CBC) est une famille de méthodes de continuation expérimentale qui combine ces deux caractéristiques. Cependant la CBC nécessite de connaître la fréquence de fonctionnement du système, ce qui n'est pas le cas a priori pour les systèmes auto-oscillants. La fréquence doit alors être déterminée en temps réel pendant l'expérience. Dans la CBC en plan de phase (PPCBC, voir Lee et al., 2020), la fréquence est mise à jour itérativement par une méthode de détection de passage à zéro.

Dans cette présentation, une mise en œuvre de la CBC est proposée pour un musicien artificiel produisant des auto-oscillations, développé dans le cadre d'une collaboration entre le LMA et Yamaha et utilisé pour l'expérimentation en acoustique musicale. De l'air sous pression est injecté entre les lèvres via un tube faisant office de résonateur. Une embouchure de cuivre peut ensuite être placée en aval des lèvres. Ici, l'estimation de la fréquence est réalisée en temps réel grâce à une boucle à verrouillage de phase et un algorithme de continuation par longueur d'arc (Raze et al., 2025 ; Gourc et al. 2025) est mis en place. Une simulation de l'expérience ainsi que de premiers retours expérimentaux sont présentés.

Vers la continuation expérimentale de point de bifurcation Fold**15:30***E. Gourc (LMA), R. Caron (LMA), F. Silva (LMA), C. Vergez (LMA), B. Cochelin (LMA)*

Ce travail s'intéresse à la continuation expérimentale des points de bifurcation de type Fold. Pour cela, un algorithme de contrôle combinant une méthode de continuation basée sur le contrôle et une méthode de contrôle extrême a été développée. L'étude analytique du comportement du contrôleur permet d'explicitier des règles de choix des différents gains. Son fonctionnement est appliqué au suivi des bifurcations de type Fold d'un oscillateur de Duffing.

A model- and derivative-free arclength continuation method for tracing bifurcation diagrams in nonlinear systems**15:45***A. Spits (ULiège), G. Raze (ULiège), G. Kerschen (ULiège)*

Nonlinear mechanical systems can exhibit multiple coexisting periodic responses, including both stable and unstable solutions. These responses encompass fundamental, superharmonic, and subharmonic resonances, which are essential for understanding the full system dynamics but are often overlooked in classical experimental studies.

Traditional open loop testing methods are unable to track unstable branches, resulting in missed solutions, sudden jumps at bifurcations, and incomplete bifurcation diagrams. Isolated branches, in particular, are challenging to access without advanced control strategies.

Control-based continuation methods have emerged as powerful experimental tools. This study presents applications of an extended version of a derivative- and model- free arclength control based continuation method (x-ACBC), which enables the experimental identification of complete bifurcation diagrams. By combining a double sweep strategy with temporarily invasive control, x-ACBC successfully accesses unstable and isolated periodic responses.