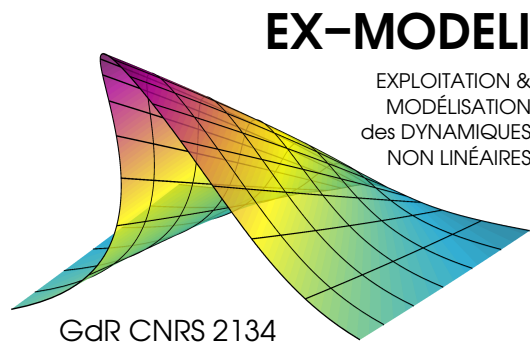




Journées annuelles du Groupement de Recherche EX-MODELI

15 - 16 octobre 2026, LMA Marseille

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 et porteuses du GdR

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

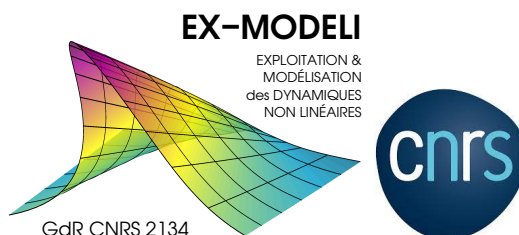
Comité local d'organisation

Pour cette édition, nous avons la chance d'être accueillis par le Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique à Marseille. Ces journées sont rendues possibles par le comité d'organisation local:

Stéphane BOURGEOIS
Bruno COCHELIN
Etienne GOURC
Pierre-Olivier MATTEI
Christophe VERGEZ

Sponsors

Enfin, nous remercions chaleureusement les différents organismes qui ont sponsorisé ces journées:



Programme

15 octobre 2026

9:30 - 10:00 : Accueil et présentation des journées	7
10:00 - 11:00 : Méthode de synthèse modale pour les systèmes non-linéaires, application aux contacts frottants et limites de l'approche Craig-Bampton, Samuel Quaegebeur (École Centrale de Lyon/LTDS)	7
11:00 - 11:15 : Pause	7
11:15 - 12:15 : Difficultés (défis et difficultés) en analyse modale non-régulière, Mathias Legrand (École Centrale de Nantes/GeM)	7
12:15 - 14:00 : Pause déjeuner	8
14:00 - 15:00 : Prédire la dynamique des systèmes multistables : au-delà de l'analyse de bifurcation, Soizic Terrien (CNRS/LAUM) et Baptiste Bergeot (INSA CVL/LaMé)	8
15:00 - 15:15 : Pause	8
15:15 - 16:15 : Continuation expérimentale, de la théorie à la pratique, Étienne Gourc (LMA)	8
16:15 - 16:30 : Pause	8
16:30 - 18:00 : Visite du laboratoire	8

16 octobre 2026

9:00 - 9:30 : Conférence plénière - 1^{ère} partie: La dynamique non linéaire et les cuivres - qu'apprend-on et que peut-on envisager pour la conception d'instruments de musique ?, Vincent Fréour (Yamaha)	9
9:30 - 10:00 : Conférence plénière - 2^{ème} partie: Bifurcation scenarios for saxophone sound synthesis, Tom Collinot (Buffet Crampon)	9
10:00 - 10:30 : Pause café	9
10:30 - 12:00 : Session 1(Chair : Benjamin Chouvion)	9
10h30-10h45 : Modélisation non linéaire des lignes d'un kite de traction et impact de leur déformée sur la dynamique de vol, Marguerite de La Bigne (CREA/Ecole de l'air et de l'espace)	9
10h45-11h00: Comportement non linéaire des plaques microperforées sous fortes excitations mécaniques, Lucie Gallerand (LISPEN/ENSAM)	9
11h00-11h15: Amortissement des vibrations par une structure composite à âme granulaire : validation expérimentale d'un modèle numérique, Mahdi Essid (EULER/ISAE-Supemeca; ESTACA)	10
11h15-11h30: Méthode de sous-structuration dynamique utilisant les modes non linéaires pour la réduction de modèles combinant non-linéarité distribuée et localisée, Charlie Bastien (Safran Tech)	10
11h30-11h45: Méthodes d'apprentissage adaptatives pour la construction de méta-modèles des réponses vibratoires non-linéaires d'un rotor fissuré en milieu incertain, Erwan Dehillerin (PLATON/Inria Saclay; LTDS/ECL)	11
11h45-12h00: Learning Model Discrepancy using Sparse Bayesian Polynomial NARX, Eyoel Atnafe (FEMTO-ST,UMLP)	11
12:00 - 13:30 : Pause déjeuner	12
13:30 - 14:30 : Session 2 (Chair : Aurélien Grolet)	12
13h30-13h45: A comprehensive frequency-domain framework for Lyapunov stability and bifurcation analysis of quasi-periodic solutions via Koopman-Hill projections, Shakiba Dowlati (LaMCoS/INSA Lyon)	12
13h45-14h00: Calcul par continuation de la variété stable séparatrice entre les bassins d'attraction d'un modèle 4D d'instrument à vent, Thomas Passa (LAUM)	12
14h00-14h15: Suivi de courbe de bifurcation expérimentale de membranes élastiques sous déformation extrême, Pierre-Olivier Mattei (LMA)	13
14h15-14h30: Data-Driven Synthesis of Phase-Locked Loop Controllers for Backbone Tracking, François Winand (Univ. Liège, Univ. Libre de Bruxelles)	13
14:30 - 15:00 : Pause	14
15:00 - 16:00 : Session 3 (Chair : Sébastien Baguet)	14
15h00-15h15: Passive aeroelastic vibration control of a geometrically nonlinear flexible wing using a flap-based nonlinear absorber, Kailash Dhital (CREA/Ecole de l'Air et de l'Espace)	14
15h15-15h30: A hybrid nonlinear energy sink with adaptive nonlinear stiffness tuning for high-energy external excitations, Louis Mesny (ICA)	14
15h30-15h45: Dynamic Buckling-type Phenomenon Induced by Nonlinear Modal Interaction in Finite Rotating Auxetic Metamaterials, Yi Yao (LTDS/ECL)	15
15h45-16h00: Superharmonic Mechanical Solitons in Nonlinear Disordered Metastructures, Lucas José Dantas Alcântara (USP)	15

16:00 - 16:15 - Clôture	16
-----------------------------------	----

Quelques informations pratiques



Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique

Conférence

Les journées annuelles du GDR EX-MODELI auront lieu les 15 et 16 Octobres 2026 au Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique à Marseille. L'entrée du site est située au 4 Impasse Nikola Tesla. Les conférences se dérouleront dans l'amphithéâtre Canac dans le hall du LMA. Un plan d'accès est donné sur la page suivante.

Repas du midi

Les repas du midi seront pris dans le grand Hall du LMA, au rez de jardin.

Accès WIFI

L'accès se fait avec EDUROAM.

Repas du jeudi soir

Le repas du jeudi soir aura lieu à partir de 20h30 à la Nautique, sur le vieux port au 20 Quai de Rive Neuve



Plan d'accès restaurant jeudi soir

Accès au LMA

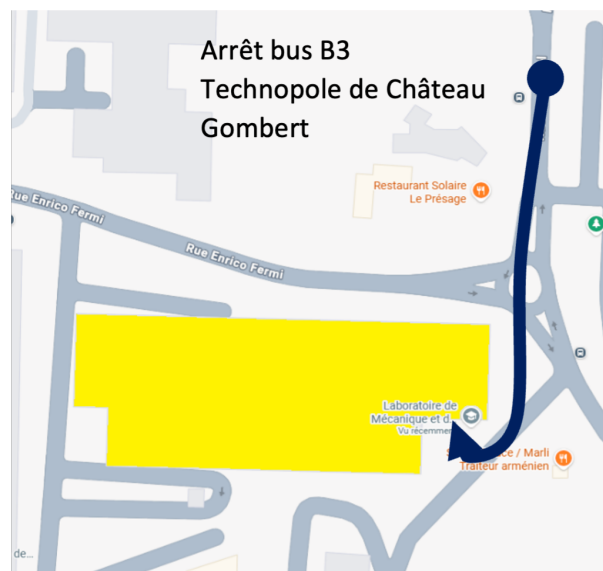
Adresse : 4 Impasse Nikola Tesla, 13013, Marseille

Accès en métro : prendre la ligne 1 jusqu'à son terminus la Rose. Prendre ensuite le bus B3 jusqu'à son terminus Technopole de Château Gombert.

Remarque : Le bus B3 est souvent bondé le matin, les courageux.ses peuvent rejoindre le LMA à pied (environ 25 minutes de marche, plan ci-dessous).



Itinéraire à pieds depuis la Rose pour rejoindre le LMA



Accès LMA depuis arrêt de bus Technopole de Château Gombert

15 octobre 2026 — 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 : Méthode de synthèse modale pour les systèmes non-linéaires, application aux contacts frottants et limites de l'approche Craig-Bampton, Samuel Quaegebeur (École Centrale de Lyon / LTDS)

La méthode de Craig-Bampton est largement utilisée pour réduire le coût des simulations dynamiques de structures complexes tout en préservant les degrés de liberté d'interface nécessaires à l'assemblage des sous-structures.

Cette présentation rappellera les principes de cette méthode et montrera pourquoi cette approche est particulièrement adaptée aux systèmes présentant des contacts frottants localisés. Les limites de la méthode seront également discutées. En particulier, les problèmes multiphysiques (exemple : thermomécaniques) ou bien présentant des effets non-linéaires géométriques mettent en difficulté la convergence de la réduction de type Craig-Bampton et nécessitent le recours à des stratégies plus avancées de réduction de modèle.

Cette intervention vise ainsi à fournir une vision pratique du domaine d'application et des limites de ces techniques dans un contexte industriel.

11:00 - 11:15 : Pause

11:15 - 12:15 : Déficultés (défis et difficultés) en analyse modale non-régulière, Mathias Legrand (École Centrale de Nantes/GeM)

Cette présentation introduit des formulations d'analyse modale non régulière pour des systèmes académiques, discrets comme continus, dont la dynamique est marquée par des non-régularités telles que le contact unilatéral, l'impact ou même le frottement sec de Coulomb. Différentes méthodes de résolution sont proposées afin de construire le spectre non linéaire de ces systèmes, c'est-à-dire l'ensemble de leurs modes non linéaires et des fréquences associées. Enfin, plusieurs questions ouvertes relatives à la stabilité des solutions seront discutées, en particulier celle des bifurcations dites "rasantes", dont l'analyse est toujours ouverte.

12:15 - 14:00 : Pause déjeuner

14:00 - 15:00 : Prédire la dynamique des systèmes multistables : au-delà de l'analyse de bifurcation, Soizic Terrien (CNRS/LAUM) et Baptiste Bergeot (INSA CVL/LaMé)

De nombreux systèmes dynamiques non linéaires rencontrés en physique, en biologie, dans les sciences du climat ou encore en ingénierie peuvent présenter plusieurs états stables pour un même jeu de paramètres. Cette nature multistable peut (i) rendre ces systèmes particulièrement sensibles aux conditions initiales et (ii) conduire à des transitions soudaines d'un état stable à un autre—appelées basculement—notamment lorsque les paramètres évoluent au cours du temps. Si l'analyse classique des bifurcations révèle les régimes permanents possibles pour un jeu de paramètres donné, elle ne prédit en général ni les bassins d'attraction des solutions stables (c'est-à-dire l'ensemble des conditions initiales menant à une solution stable donnée), ni les basculements induits par la pente (vitesse) de variation des paramètres, c'est-à-dire la pente critique au-delà de laquelle le système bascule vers un autre état. Ce cours vise à illustrer les notions de bassin d'attraction et de basculement induit par la vitesse sur des modèles d'instruments de musique, pour lesquels la sélection des régimes est primordiale, que ce soit du point de vue du facteur d'instruments ou de celui du musicien. Nous présenterons ensuite les concepts clés permettant de caractériser ces bassins et ces basculements, en particulier celui de séparatrice, ainsi que les méthodes numériques pour y parvenir en pratique.

15:00 - 15:15 : Pause

15:15 - 16:15 : Continuation expérimentale, de la théorie à la pratique, Étienne Gourc (LMA)

Les méthodes de continuation numériques sont maintenant considérées comme un outil classique en dynamique non linéaire pour obtenir les courbes de réponses en fréquence. Expérimentalement, la situation se complique. Les méthodes *classiques* d'analyse modale expérimentale ne sont pas adaptées à l'étude des systèmes non linéaires. Le développement récent des méthodes de continuation expérimentale, faisant appel à une boucle de rétroaction, constitue une piste prometteuse pour fournir à l'expérimentateur un équivalent des méthodes de continuation numérique. Dans cette présentation, nous verrons comment construire, pas à pas, un contrôleur permettant de stabiliser et suivre les branches de solutions d'un système non linéaire.

16:15 - 16:30 : Pause

16:30 - 18:00 : Visite du laboratoire

16 octobre 2026

9:00 - 9:30 : Conférence plénière - 1^{ère} partie: La dynamique non linéaire et les cuivres - qu'apprend-on et que peut-on envisager pour la conception d'instruments de musique ?, Vincent Fréour (Yamaha)

La modélisation physique est une approche particulièrement pertinente pour étudier le comportement de systèmes auto-oscillants comme les instruments de musique à vent et notamment les cuivres. L'analyse de la dynamique du système, à travers des méthodes comme la continuation numérique ou l'intégration temporelle, permet de mettre en lumière l'influence de paramètres du modèle sur les bifurcations, les solutions et leur stabilité. Ces informations peuvent ensuite être reliées à des caractéristiques propres de l'instrument (justesse, jouabilité, dynamique de jeu, etc.). Dans cet exposé nous retracerons les résultats principaux de huit années de collaboration avec le LMA sur ce sujet, et discuterons les perspectives de ces travaux pour l'aide à la facture instrumentale.

9:30 - 10:00 : Conférence plénière - 2^{ème} partie: Bifurcation scenarios for saxophone sound synthesis, Tom Collinot (Buffet Crampon)

We seek a better knowledge of simple saxophone models so we can integrate them in physical modeling synthesizers. We use numerical continuation to explore the periodic solution branches of a two-mode saxophone model with reed dynamics. An automatic procedure is designed for the continuation to explore all of the bifurcation diagrams for every tested parameter combination, which allows to test a very wide range of system parameters. As a result, a finite list of the possible behaviors of a two-mode saxophone model with reed dynamics is established. These behaviors are grouped in "bifurcation scenarios", i.e. the order in which the specific bifurcations appear on each branch of the bifurcation diagram. These bifurcation scenarios are well explained by combining known scenarios tied to the normal forms of nearby high codimension bifurcations: the 2:1 resonant double Hopf bifurcation of codimension 3, and the Cusp and Bautin bifurcations of codimension 2. We highlight interesting cases where periodic solution branches interconnect through branching points.

10:00 - 10:30 : Pause café

10:30 - 12:00 : Session 1: Modélisation et méthodes numériques (Chair : Benjamin Chouvion)

Modélisation non linéaire des lignes d'un kite de traction et impact de leur déformée sur la dynamique de vol

10:30

M. de La Bigne (CREA/Ecole de l'air et de l'espace), B.chouvion (CREA/Ecole de l'air et de l'espace), C. Bertrand (LISPEN/ENSAM)

L'objectif général du projet concerne la modélisation de voiles de traction (ou kite) utilisées pour la décarbonation du transport maritime. Les travaux présentés portent spécifiquement sur les lignes d'attache, qui permettent le contrôle du kite. Le but est d'établir des critères de vitesse de ravalement pour prévenir des situations critiques, comme la chute du kite par vent faible.

Dans la plupart des outils de simulation existants, les lignes sont supposées droites. En réalité, elles se déforment grandement sous l'effet d'efforts aérodynamiques. Le ventre des lignes introduit un délai dans la transmission des commandes de ravalement, ce qui affecte la réponse dynamique du système. Pour caractériser ce comportement, deux méthodes numériques ont été comparées : un modèle analytique de chaîne (à charge linéique constante) et une modélisation par éléments finis de câbles non linéaires.

Les efforts aérodynamiques dépendent de l'altitude et de la déformée des lignes, ce qui introduit de fortes non-linéarités en présence d'un ventre important. Dans la simulation par éléments finis, le problème est résolu de manière itérative, en considérant successivement des problèmes élastiques où les forces aérodynamiques sont fixées, puis réactualisées jusqu'à convergence de la solution.

Des cas-tests numériques ont permis d'évaluer l'impact de la longueur des lignes et de leur vitesse de ravalement sur le retard de commande et le maintien du contrôle dynamique du vol. Enfin, en pré-imposant une trajectoire au kite, nous montrons que la prise en compte du ventre des lignes amène un déphasage temporel entre leurs tensions et la rotation effective du kite.

Comportement non linéaire des plaques microperforées sous fortes excitations mécaniques

10:45

L. Gallerand (LISPEN/ENSAM), M. Legrand (GeM/ECN), P. Leclaire (DRIVE/Univ. Bourgogne Europe) T. Dupont (École de technologie supérieure)

Les plaques microperforées (MPP) sont des structures simples pouvant fonctionner dans des conditions sévères et résister à des excitations mécaniques de forte amplitude. Il a été démontré que les MPP dissipent de l'énergie grâce aux effets thermovisqueux dans les couches limites fluides au voisinage des parois des perforations. En régime linéaire, l'amortissement additionnel est maximal à une fréquence caractéristique déterminée par les paramètres des perforations. Cependant, son comportement lorsque l'amplitude des excitations mécaniques augmente reste mal compris.

Les MPP étant constituées d'une partie fluide et d'une partie solide, deux types de non-linéarités apparaissent progressivement avec l'augmentation de l'excitation. Les non-linéarités induites par le fluide dans les perforations apparaissent en premier. À plus forte amplitude, les grandes déformations de la partie solide font ensuite apparaître une non-linéarité géométrique. Un modèle analytique, fondé sur le modèle linéaire des MPP et la loi de Forchheimer pour le fluide, ainsi que sur le modèle de von Kármán pour le solide, est proposé afin de décrire ces deux contributions non linéaires.

Les résultats obtenus sur le premier mode montrent que l'amortissement additionnel non linéaire associé au fluide atteint un maximum à une fréquence caractéristique dépendant de la vitesse relative fluide-solide et des paramètres des perforations. Il présente également une dépendance spatiale, avec un maximum dans les zones où la vitesse relative fluide-solide atteint la vitesse critique. À plus forte excitation, la non-linéarité du solide intervient et son effet de raidissement compense progressivement l'adoucissement induit par le fluide, jusqu'à un point d'équilibre.

Amortissement des vibrations par une structure composite à âme granulaire : validation expérimentale d'un modèle numérique

11:00

M. Essid (EULER/ISAE-Supemeca; ESTACA), A. Faulconnier (EULER/ISAE-Supemeca, LPENSL/ENS Lyon), J. Brocail (ESTACA), J.-B. Casimir (EULER/ISAE-Supemeca), S. Job (EULER/ISAE-Supemeca)

Les structures composites granulaires constituent une solution prometteuse pour le contrôle des vibrations grâce aux mécanismes dissipatifs liés aux interactions et aux réarrangements des particules. Leur comportement dissipatif est en effet ajustable, dépendant notamment des conditions de confinement et du niveau de déformation. Ce travail propose un bref état de l'art des approches utilisant les milieux granulaires pour l'amortissement vibratoire, ainsi que l'étude d'une poutre multicouche intégrant une âme granulaire confinée. Une campagne d'essais en vibration libre est menée pour différentes conditions de confinement et différents niveaux de déformation, afin de caractériser l'évolution du facteur de perte de la structure. Les résultats expérimentaux sont ensuite comparés à des résultats issus d'une simulation numérique fondée sur un modèle représentant le comportement dissipatif du milieu granulaire. Cette comparaison permet d'évaluer la capacité du modèle numérique à reproduire les tendances observées expérimentalement et de mieux identifier l'influence des paramètres de confinement et de sollicitation sur les performances dissipatives de la structure. Les résultats présentés mettent en évidence l'intérêt des milieux granulaires confinés pour le contrôle des vibrations et fournissent des éléments pratiques de dimensionnement de systèmes réels.

Méthode de sous-structuration dynamique utilisant les modes non linéaires pour la réduction de modèles combinant non-linéarité distribuée et localisée

11:15

C. Bastien (Safran Tech), Q. Mercier (Safran Tech), L. Salles (ULiège), C. Touzé (ENSTA)

La méthode de sous-structuration CMS (pour Component Mode Synthesis) est couramment utilisée pour élaborer des modèles réduits mêlant espace modal et espace physique. Son application à des systèmes non linéaires cible principalement les problèmes de contact ou de frottement, mais elle montre des limites pour les problèmes comprenant des non-linéarités distribuées.

Cette contribution étend la CMS aux non-linéarités géométriques en utilisant des modes normaux non linéaires (NNM) à interfaces fixes, obtenus via la méthode de paramétrisation directe des variétés invariantes (DPIM). Les modes statiques issus de la sous-structuration linéaire contribuent également au calcul des forces géométriques non linéaires, ce qui permet d'accroître la précision du modèle réduit.

La méthode de réduction a été appliquée à un système à 10 degrés de liberté avec frottement et non-linéarités cubiques, montrant d'excellents résultats dans les régimes dynamiques où le frottement est principalement en adhérence, car le système se rapproche du comportement des modes internes à interface fixe. Dans d'autres régimes dynamiques, on note quelques écarts qui sont dus principalement aux approximations faites lors de la construction du modèle réduit (sous-structuration en mode de glissement et modes non linéaires indépendants du forçage).

Méthodes d'apprentissage adaptatives pour la construction de méta-modèles des réponses vibratoires non-linéaires d'un rotor fissuré en milieu incertain

11:30

E. Dehillerin (PLATON/Inria Saclay; LTDS/ECL), E. Denimal Goy (PLATON/Inria Saclay), J.-J. Sinou (LTDS/ECL)

L'étude des réponses vibratoires des machines tournantes endommagées permet de connaître le niveau d'endommagement de la structure. La prise en compte d'incertitudes propres à la modélisation, à la conception ou à l'environnement est indispensable afin d'apporter une modélisation plus réaliste.

La quantification de l'impact de ces incertitudes sur la réponse dynamique non-linéaire nécessite de réaliser de nombreux tirages. Or, le calcul de ces réponses (par méthode HBM) est coûteux rendant impossible ce type d'études. Une solution classique est d'utiliser un méta-modèle. Son évaluation a un coût numérique quasi-nul, rendant possible les études de propagation d'incertitude.

La qualité d'un méta-modèle est très fortement liée à son plan d'expérience. Deux stratégies de construction existent : les méthodes offlines et les méthodes adaptatives. Les premières consistent à proposer une couverture homogène du domaine. Les secondes ajoutent des points d'apprentissage de façon itératives ciblant des zones privilégiées. Ces méthodes adaptatives permettent d'atteindre des méta-modèles plus précis à un coût de construction réduit.

Dans le contexte de l'étude sur un rotor fissuré, un méta-modèle est construit pour chaque vitesse critique et chaque amplitude de déformation. Or, un calcul HBM permet d'obtenir toutes les vitesses critiques et amplitudes de déformation pour un rotor donné. Le travail présenté ici s'intéresse au développement de méthodes adaptatives pour la construction jointe des méta-modèles de toutes les grandeurs d'intérêt. Différents critères d'acquisition sont proposés et comparés entre eux et par rapport aux approches offlines. Les résultats sont obtenus sur le cas d'un rotor fissuré modélisé par éléments finis.

Learning Model Discrepancy using Sparse Bayesian Polynomial NARX

11:45

E. Atnafe (FEMTO-ST,UMLP), R. Teloli (FEMTO-ST,UMLP), E. Sadoulet-Reboul (FEMTO-ST,UMLP) S. Cogan (FEMTO-ST,UMLP)

Comparing experimental data with numerical simulation results may reveal discrepancies that cannot be directly explained by the underlying physical model. This issue is particularly pronounced in nonlinear regimes, where the system behavior is not fully understood or where the sources of nonlinearity remain unclear. The aim of this study is to model these discrepancy errors through a data-driven framework. The proposed approach combines the NARX (Non-linear AutoRegressive with eXogenous inputs) model with the SINDy (Sparse Identification of Nonlinear Dynamical Systems) methodology. In this framework, NARX is employed to represent the discrepancy dynamics, while the nonlinear basis functions are identified using a Bayesian formulation of SINDy, which enables the quantification of uncertainty. The methodology is validated through a numerical application involving one of the nonlinear benchmarks, the Bouc-Wen hysteresis model. The approach learns an interpretable model that corresponds to the hidden hysteresis force from a noisy data and demonstrates the ability to derive an interpretable time-domain model that remains robust in the presence of measurement noise.

12:00 - 13:30 : Pause déjeuner

13:30 - 14:30 : Session 2: Méthodes numérique et expérimentale pour la continuation - (Chair : Aurélien Grolet)

A comprehensive frequency-domain framework for Lyapunov stability and bifurcation analysis of quasi-periodic solutions via Koopman-Hill projections

13:30

S. Dowlati (LaMCoS/INSA Lyon), R. Alcorta (LaMCoS/INSA Lyon)

Quasi-periodic motion arises in many engineering systems, from gear transmissions to coupled oscillators and rotor systems, whenever two or more incommensurate frequencies coexist. The stability analysis and bifurcation classification of such motions cannot be addressed by classical Floquet theory, which does not extend to solutions confined to invariant tori. Methods based on Lyapunov exponents are typically used, which are computationally demanding and unable to address these two tasks simultaneously. In this work, a unified approach is proposed for stability evaluation and bifurcation classification of quasi-periodic solutions of nonlinear dynamical systems, based on the Harmonic Balance Method (HBM). The first-order Lyapunov exponent spectrum is computed via the Koopman-Hill projection, entirely bypassing the time integration required by existing methods. The bifurcation type is identified from the topology of the dominant Lyapunov bundles over the Poincaré sections, by examining the global orientation of the dominant Lyapunov bundles around the invariant closed curves. Furthermore, a harmonic selection procedure is proposed to automatically disregard the harmonics with negligible contribution to the solution, rendering quasi-periodic HBM viable for large and complex systems. The proposed approach is shown to retain its accuracy for reduced harmonic bases. The approach is validated on the quasi-periodically forced Duffing oscillator against results reported in the literature, and further demonstrated on higher-dimensional mechanical systems of engineering relevance.

Calcul par continuation de la variété stable séparatrice entre les bassins d'attraction d'un modèle 4D d'instrument à vent

13:45

T. Passa (LAUM), S. Terrien (LAUM) S. Maugeais (LMM, LAUM) B. Gazengel (LAUM)

Un modèle à quatre dimensions d'un instrument de musique à vent est étudié. Son diagramme de bifurcation est tracé en fonction d'un paramètre de contrôle correspondant à la pression dans la bouche du musicien. Une zone de bistabilité entre deux solutions périodiques stables, caractérisées par des fréquences différentes, est alors mise en évidence. D'un point de vue acoustique, cette bistabilité signifie qu'une même pression dans la bouche du musicien peut conduire à deux notes distinctes.

La connaissance des bassins d'attraction de chaque solution est alors déterminante pour comprendre l'influence des conditions initiales sur le régime final de jeu. Dans ce travail, on cherche à caractériser ces bassins en identifiant l'objet constituant leur frontière. Celle-ci pouvant être formée par la variété stable d'une solution instable, on examine les différentes solutions instables présentes dans la zone de bistabilité.

Une analyse des multiplicateurs de Floquet de ces solutions permet alors d'identifier la solution instable dont la variété stable est de dimension trois, une condition nécessaire pour constituer une frontière entre deux objets de dimension quatre.

Cette variété est ensuite calculée à l'aide d'une méthode de continuation, fondée sur la formulation d'un problème aux limites dont les solutions sont des trajectoires appartenant à la variété stable. La variété, représentée comme une collection de trajectoires, est enfin comparée à une estimation de la frontière obtenue par simulations numériques afin de confirmer qu'elle constitue bien la frontière séparatrice entre les deux bassins.

Suivi de courbe de bifurcation expérimentale de membranes élastiques sous déformation extrême

14:00

R. Côte (LMA), E. Gourc (LMA), P.-O. Mattei (LMA)

Nous nous intéressons dans cette présentation à des résultats expérimentaux sur les vibrations en déformation extrêmes de membranes élastiques en forçage périodique.

Sous certaines configurations expérimentales deux modes de vibration fortement non-linéaires coexistent dans une certaine gamme d'amplitude et de fréquence de forçage tout en présentant des comportements vibratoires significativement différents. Le premier de ces modes vibratoires (nommé mode A) peut se décrire comme une somme de composantes harmoniques de déformées axisymétriques. Le second (nommé mode B) peut se décrire comme une somme de composantes harmoniques de déformées axisymétriques et non axisymétriques. Si, pour une amplitude et une fréquence de forçage données, il est relativement aisé de mettre en évidence et de mesurer ces deux modes, estimer leur diagramme de bifurcation est un challenge.

Un dispositif à bas coût qui permet le suivi de courbe de bifurcation expérimentale par une boucle de contrôle à verrouillage de phase a été développé au LMA. Ce système a été mis en œuvre pour mesurer les diagrammes de bifurcation de ces deux modes vibratoires.

Data-Driven Synthesis of Phase-Locked Loop Controllers for Backbone Tracking

14:15

F. Winand (Univ. Liège, Univ. Libre de Bruxelles), C. Collette (Univ. Liège, Univ. Libre de Bruxelles), G. Kerschen (Univ. Liège)

Among experimental continuation methods, phase-locked loops (PLLs) are increasingly used in nonlinear vibration testing, in particular for the measurement of backbone curves. Their performance, however, strongly depends on the design of the feedback controller. In practice, a proportional-integral (PI) controller is traditionally tuned heuristically, through trial and error, or based on analytical models derived from the method of averaging. Such approaches offer limited flexibility when specific experimental configurations or control architectures are considered.

This work proposes a novel data-driven methodology for tuning PLL controllers. The local phase dynamics, capturing the characteristics of both the structure under test and the phase detector, are identified directly from frequency-domain measurements. PLL testing is thereby recast as a classical feedback control problem, making the well-established tools of the classical control community readily applicable. Controller synthesis then becomes a deterministic problem: various control architectures can be evaluated and compared, and established tools can be leveraged, such as automated controller synthesis based on classical robustness indicators like the phase margin.

The versatility of the proposed approach is demonstrated numerically and experimentally through the identification of backbone curves corresponding to primary and secondary resonances of nonlinear systems. In particular, the synthesis of PI controllers is fully automated based on user-specified stability margins. Furthermore, the results show that control architectures beyond the conventional PI controller can yield significant gains in tracking performance and robustness.

14:30 - 15:00 - Pause

15:00 - 16:00 - Session 3: Problèmes multiphysiques - (Chair : Sébastien Baguet)

Passive aeroelastic vibration control of a geometrically nonlinear flexible wing using a flap-based nonlinear absorber

15:00

K. Dhital (CREA/Ecole de l'Air et de l'Espace), F. Lartigue (ICA/ISAE-Supaéro), B. Chouvion (CREA/Ecole de l'Air et de l'Espace), G. Michon (ICA/ISAE-Supaéro)

The present study investigates passive aeroelastic vibration control of a flexible wing using a flap-based nonlinear absorber, with particular emphasis on suppressing post-flutter limit-cycle oscillations (LCOs). The finite-element structural model of the wing is reduced onto a modal basis while retaining the geometric nonlinearities associated with large displacements through the Stiffness Evaluation Procedure (STEP), thereby providing a reduced-order representation of the nonlinear structural dynamics. The reduced structural model is then coupled with an unsteady aerodynamic model based on the Doublet Lattice Method. Both linear and geometrically nonlinear transient aeroelastic analyses are performed to characterize flutter onset and the post-flutter response of the flexible wing. A flap-based nonlinear absorber, incorporating both linear and nonlinear restoring characteristics, is introduced as a passive control device. Its influence on the coupled wing-flap dynamics is systematically investigated, with particular attention to energy transfer from the primary wing modes to the absorber. Control performance is primarily evaluated in terms of post-flutter LCO amplitude. The results demonstrate that the flap-based nonlinear absorber can substantially reduce LCO amplitude, highlighting its potential as an effective passive strategy for mitigating undesirable aeroelastic oscillations in flexible wings.

A hybrid nonlinear energy sink with adaptive nonlinear stiffness tuning for high-energy external excitations**15:15**

L. Mesny (ICA), K. Dekemele (Aerospace & Mechanical engineering), S. Baguet (LaMCoS), G. Habib (Budapest University of Technology and Economics), G. Michon (ICA), S. Chesné (LaMCoS)

This study presents a hybrid nonlinear energy sink (HNES) designed to overcome the fixed activation threshold and performance limitations of traditional passive NES devices. By adjusting its non-linear stiffness and damping in real time according to the excitation level, the hybrid system adaptively modifies its activation threshold. The hybrid absorber consists of an active part and a passive part. The active subsystem is implemented using two colocated voice coils, one functioning as a sensor and the other as an actuator, while the passive nonlinearity is generated by a mass moving along a non-linear track. The concept is experimentally validated on a single-degree-of-freedom structure representing a single-storey building equipped with the absorber. The experimental observations are interpreted using the Slow Invariant Manifold (SIM), extended to include control terms. This framework allows the identification and visualisation of the different dynamic regimes of the proposed HNES, demonstrating its effectiveness and versatility in vibration attenuation.

Dynamic Buckling-type Phenomenon Induced by Nonlinear Modal Interaction in Finite Rotating Auxetic Metamaterials**15:30**

Y. Yao (LTDS/ECL), M. Collet (LTDS/ECL), A. Ture Savadkoobi (LTDS/ENTPE), B. Chomette (LTDS/ECL), C.-H. Lamarque (LTDS/ENTPE), E. De Bono (Univ. of Naples)

This work develops an analytical discrete model to investigate the nonlinear dynamic buckling type vibrations and an isolation band observed in an auxetic rotating polygonal metamaterial under harmonic excitations. Unlike conventional static buckling triggered by hinge instability, this dynamic phenomenon originates from strong nonlinear coupling between the global longitudinal mode and local rotational mode. The proposed model idealizes each cell as a rigid body with three generalized displacements, while the connecting hinges are represented by longitudinal, shear, and rotational springs with polynomial stiffness laws. The discrete model is validated against FE results in both static force displacement responses and linearized modal analyses. Dynamic simulations reveal that the rotational mode, although not directly excited by the vertical external force, becomes activated via nonlinear energy transfer from the directly forced longitudinal mode. Subharmonic and superharmonic resonances are demonstrated in both modal coordinates, with the rotational contribution growing significantly as the excitation amplitude increases. This work not only uncovers a previously overlooked dynamic nonlinear mechanism in auxetic metamaterials, but also provides an analytical framework for predicting and designing tunable metamaterials with potential applications in vibration isolation.

Superharmonic Mechanical Solitons in Nonlinear Disordered Metastructures

15:45

L. José Dantas Alcântara (USP), A. S. Barbosa (USP), R. da S. Raqueti (UMLP), N. Kacem (UMLP), L. P. R. de Oliveira (USP), N. Bouhaddi (UMLP)

Mechanical metastructures have attracted increasing interest for vibration mitigation, wave manipulation, and energy localization. In nonlinear systems, the interplay between nonlinearity and disorder can promote spatial localization through the nucleation of mechanical solitons. While these phenomena have been mainly investigated near primary resonances, their behavior under secondary resonances remains less explored. Superharmonic resonances provide an attractive alternative, particularly for miniaturized systems, by enabling nonlinear responses at excitation frequencies below the fundamental resonance. This work investigates stationary mechanical solitons in damped nonlinear disordered metastructures operating near a third-order superharmonic resonance. The system is modeled as a one-dimensional lattice of coupled Duffing oscillators with local disorder. Using the Method of Multiple Scales, a reduced-order formulation is derived, leading to a Discrete Nonlinear Schrödinger Equation combined with a higher-order reconstitution relation. The reduced-order predictions are validated through numerical simulations of the complete nonlinear lattice using frequency-domain continuation and time-domain integration. Localized states are obtained in both hardening and softening regimes. The results also highlight the importance of phase interactions in reconstructing the physical superharmonic response. Stochastic analyses show that localization persists under uncertainties in damping, excitation amplitude, and natural frequencies, although its occurrence decreases as uncertainty increases. Overall, superharmonic excitation provides an effective mechanism for generating and controlling mechanical solitons beyond primary resonance, offering perspectives for vibration control and energy management in miniaturized metastructures.

16:00 - 16:15 - Clôture