



Journées annuelles du Groupement de Recherche EX-MODELI

17 - 18 octobre 2024
INSA Lyon

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

17 octobre 2024 — Matin	6
9:30 - 10:00 : Introduction, Présentation des journées	6
10:00 - 10:30 : Modes non linéaires	6
10h00-10h30 : Cyril Touzé (ENSTA Paris) et Olivier Thomas (Arts et Métiers Lille), Modes non linéaires et formes normales, des premières briques aux développements actuels	6
10:30 - 12:30 - Absorbeurs d'énergie non linéaires	6
10h30-11h10 : P-O. Mattei (CNRS/LMA), Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur le NES (sans jamais oser le demander)	6
11h10-11h30: A. Ture Savadkoohi (ENTPE), Targeted energy transfer in coupled oscillators	6
11h30-11h50 : B. Vaurigaud (Cerema), Contrôle vibratoire passif d'une structure linéaire à plusieurs degrés de liberté sous excitation harmonique à l'aide d'absorbeurs non-linéaires multiples en parallèle	6
11h50-12h10 : M. Weiss (Ministère de l'Environnement de l'Énergie et de la Mer), Dimensionnement d'absorbeurs d'énergie non linéaires pour le contrôle des vibrations des câbles	7
12h10-12h30 : Z. Dimitrijevic (Stellantis), Applications prototypes d'absorbeurs d'énergie non linéaires dans l'automobile	7
12:30 - 14:30 : Repas	7
17 octobre 2024 — Après-Midi	8
14:30 - 16:30 : Dynamique non lisse	8
14h30-15h10 : B. Brogliato (Inria), Backstepping control and NES: few thoughts on couplings in Automatic Control and in Nonlinear Dynamics	8
15h10-15h30 : S. Junca (LJAD Math.), Temps de premier retour pour un système avec impacts à N-ddl près d'un mode linéaire rasant	8
15h30-15h50 : G. James (LKJ), Propagation de fronts dans des chaînes granulaires	8
15h50-16h10 : J. Bastien (Université Lyon 1), Modèles élastoplastiques décrits par des inclusions différentielles maximales monotones	8
16h10-16h30 : C. Bertrand (ENSAM), Equilibres d'un câble non-compressible soumis à des contraintes unilatérales	8
16:30 - 17:00 : Pause	9
17:00 - 18:00 - Applications	9
17h00-17h20 : O. Dazel (Université du Mans), Modes linéaires (!) et milieux acoustiques	9
17h20-17h40 : E. Gourdon (ENTPE/LTDS), Résonateurs non linéaires passifs et semi-actifs pour atténuer le bruit	9

17h40-18h00: S. Baguet (INSA Lyon/LAMCOS), Principes innovants de détection de masse via l'exploitation des non linéarités	9
18 octobre 2024 — Matin	10
10:00 - 11:00 - Session 1 - Axes 1 et 3 (Chair : C. Touzé)	10
10h00-10h15 : A. Haudeville (LMSSC, L2EP, LISPEN), Piezo-elasto-hydrodynamic models for piezoelectric shunt damping of hydrofoils	10
10h15-10h30 : R. Zhang (UPS), Piezoelectric fluid energy harvesters by monolithic fluid-structure-piezoelectric coupling: a full-scale finite element model	10
10h30-10h45: Xia Zixu (UPS), Direct parametrisation of invariant manifold with shell finite element: nonlinear dynamics of thin structures using reduced order modelling	10
10h45-11h00 : A. de Figueiredo Stabilé (ENSTA Paris), Paramétrisation de variétés invariantes pour problèmes mécaniques : application aux systèmes soumis à une bifurcation de Hopf	11
11:00 - 11:45 : Pause	11
11:45 - 12:45 - Session 2 Axes 1 et 3 (Chair : B. Bergeot)	11
11h45-12h00 : E. Gourc (LMA), Etude théorique et expérimentale d'un NES réglable	11
12h00-12h15 : A. Faulconnier (Lab. Quartz), Bistabilité via flambement : de la statique à la dynamique	11
12h15-12h30 : M. Wijnand (LAUM), Analyse de bifurcation d'un modèle minimal d'un instrument à corde frottée	12
12h30-12h45 : T. Passa (LAUM), Calcul de bassin d'attraction de solutions périodiques pour un modèle 4D de saxophone	12
12:45 - 14:45 : Repas	13
18 octobre 2024 — Après-Midi	14
14:45 - 16:15 - Axe 3 - (Chair : S. Baguet)	14
14h45-15h00 : D. Dureisseix (INSA Lyon), Jusqu'où pousser la non-régularité en dynamique transitoire explicite ?	14
15h00-15h15 : L. Salles (Univ. Liège), Computational methods for whirl flutter analysis of urban air mobility vehicles	14
15h15-15h30 : V. Mahé (Inria Rennes), Computing the dynamics of periodic waveguides with nonlinear boundaries using the Wave Finite Element Method	14
15h30-15h45 : A. Chukwu (ONERA, ENSTA Paris), Ground Vibration Testing with phase-locked loop control for the identification of nonlinear vibratory behaviour	15
15h45-16h00 : E. Capiiez-Lernout (UGE, MSME), Recalage d'un modèle de substitution en dynamique stochastique non linéaire avec données partielles : application aux tuyères aérospatiales	15
16h00-16h15: E. Jacquelin (LBMC), Systèmes aléatoires impacteur-impactés : une description par chaos polynomiaux	16

Quelques informations pratiques

Conférence

Les journées annuelles du GDR EX-MODELI ont lieu les 17 et 18 octobre 2024 à Lyon (Villeurbanne). Les conférences se dérouleront dans l'amphithéâtre Marc Seguin, 27 av. Jean Capelle sur le site de l'INSA de Lyon.

Repas du midi

Les repas seront pris au restaurant CNRS La table d'Einstein, 2 avenue Albert Einstein à Villeurbanne, accessible à pieds depuis l'amphithéâtre Seguin. Chaque participant recevra des coupons à donner à la caisse. Un contrôle d'identité sera effectué sur place, la liste des convives étant fournie à l'avance.

Accès WIFI

L'accès se fait avec EDUROAM.

Repas du jeudi soir

Le repas du jeudi soir aura lieu à partir de 19h30 à la Brasserie Bouillon Baratte, 25 rue du Bât d'Argent, 69001 Lyon

Journées scientifiques en hommage à Claude-Henri-Lamarque

Claude-Henri Lamarque est titulaire d'un diplôme d'ingénieur civil de l'École Nationale des TPE (ENTPE, Université de Lyon), d'une maîtrise en mathématiques appliquées (Univ. Saint- Etienne), d'une agrégation en mathématiques, et d'un doctorat de l'École Centrale de Lyon, France. Il a obtenu une habilitation de l'Université Claude Bernard Lyon 1. Il est actuellement professeur à l'ENTPE, Université de Lyon. Il est membre du Laboratoire de Tribologie & Dynamique des Systèmes (LTDS, UMR CNRS 5513) où il est responsable de la composante ENTPE. Il est également, depuis 2011, membre du LabEx CeLyA. Ses activités de recherche se concentrent sur les comportements dynamiques non linéaires (modélisation, identification, contrôle, lisse ou non lisse, mathématiques appliquées, ondelettes, vibrations et ondes non linéaires, localisation de l'énergie, méthodes analytiques) des systèmes mécaniques avec des applications à l'ingénierie des infrastructures, aux bâtiments, aux véhicules, aux téléphériques, aux systèmes de câbles. Il a supervisé plus de 40 doctorants et de nombreux projets de recherche. Il est l'auteur de plus de 160 publications. Il a été rédacteur en chef adjoint du *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics* (2007-2014). Il est rédacteur en chef adjoint de *Nonlinear Dynamics* (2018-) et de *Journal of Vibration and Control* (2014-). Il est un expert reconnu dans le domaine de la dynamique non linéaire. Il a initié une série de conférences internationales sur les modes normaux non linéaires et la localisation (7ème conférence à Marseille en 2019). Il a été directeur du GDR 3437 CNRS DYNOLIN (2011-2019). Il est président de l'European Nonlinear Dynamics Conference (ENOC) 2020.

Claude-Henri Lamarque received his Diploma of Civil Engineer from the "Ecole Nationale des TPE" (ENTPE, University of Lyon), his Master Degree in Applied Mathematics (Univ. Saint- Etienne), Agrégation (Mathematics), his PhD from the Ecole Centrale de Lyon, France. He obtained Habilitation Degree from Univ. Claude Bernard Lyon 1. Currently he is Professor at ENTPE, University of Lyon. He is member of "Laboratoire de Tribologie & Dynamique des Systèmes" (LTDS, UMR CNRS 5513) where he is responsible of the ENTPE's component. He is also, since 2011, member of LabEx CeLyA. Prof. Lamarque's research activities focus on the nonlinear dynamical behaviours (modeling, identification, control, smooth or non smooth, applied mathematics, wavelets, nonlinear vibrations and waves, localisation of energy, analytical methods) of mechanical systems with applications to infrastructures engineering, buildings, vehicles, ropeways, cables systems. He has been the supervisor of more than 40 PhD students and of many research projects. He is the author of more than 160 publications. He has been associate editor of "Journal of Computational and Nonlinear Dynamics" (2007-2014). He is associate editor of "Nonlinear Dynamics" (2018-) and "Journal of Vibration and Control" (2014-). He is a well know expert in the field of nonlinear dynamics. He initiated a series of international conferences on Nonlinear Normal Modes and Localization (7th conference in Marseille in 2019). He has been Director of GDR 3437 CNRS DYNOLIN (2011-2019). He is chairman of European Nonlinear Dynamics Conference (ENOC) 2020.



17 octobre 2024 — Panorama des thèmes de recherche explorés par Claude-Henri Lamarque autour de la dynamique non linéaire

Cette première journée du GDR Ex-Modeli est consacrée à des exposés scientifiques mettant en valeur la grande variété des thèmes abordés par Claude Lamarque au cours de sa carrière. Des présentations ciblées et des tutoriels se succéderont sur ses thèmes de prédilection. L'ambition de la journée est de faire à la fois un panorama des connaissances en dynamique non linéaire sur les thèmes suivants : modes non linéaires, dynamique non lisse et absorbeurs de vibration non linéaires ; ainsi que de montrer l'étendue des connaissances traitées dans les travaux de Claude et son impact profond sur la communauté de dynamique non linéaire.

9:30 - 10:00 : Introduction, Présentation des journées

10:00 - 10:30 : Modes non linéaires

Modes non linéaires et formes normales, des premières briques aux développements actuels 11:15

C. Touzé (ENSTA Paris) et O. Thomas (Arts et Métiers Lille)

La relation existant entre la théorie des formes normales et la définition des modes non linéaires a été établie dès 1991 par Claude-Henri Lamarque et Louis Jézéquel dans leur article intitulé : "Analysis of non-linear dynamical systems by the normal form theory". Cette présentation reviendra sur la genèse de cette idée et explorera comment elle s'inscrit dans les différentes visions des modes non linéaires, les développements récents autour du calcul numérique des variétés invariantes et les méthodes de réduction associées, ainsi que sur leur identification expérimentale.

10:30 - 12:30 : Absorbeurs d'énergie non linéaires

Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur le NES (sans jamais oser le demander) 10:30

Pierre-Olivier Mattei (CNRS/LMA)

Cet exposé est dédié à un bilan d'une vingtaine d'année de travaux menés au LMA sur les absorbeurs vibroacoustiques non linéaires sous l'impulsion des riches idées que Claude-Henri Lamarque a partagé avec la communauté tout au long de sa carrière. Une attention toute particulière sera portée sur les absorbeurs de type membrane avec prise en compte de propriétés non usuelles telles que la bi-stabilité et l'amortissement non linéaire. On verra que sous une apparence simple, les membranes qui vibrent en grande déformation cachent une variété de comportements extrêmement riches.

Targeted energy transfer in coupled oscillators 11:10

Alireza Ture Savadkoobi, Univ Lyon, ENTPE, LTDS UMR CNRS 5513.

The concept of the targeted energy transfer can be exploited for vibration control and mastering energy exchanges between coupled oscillators and modes. One of the key issues for this concept is designing different system dynamics and endowing full capacities of nonlinear interactions between oscillators. In this talk, a general methodology for detection of fast/slow dynamics of coupled oscillators is explained which will be followed by presentation of several academic (analytical and numerical) and real applications.

Contrôle vibratoire passif d'une structure linéaire à plusieurs degrés de liberté sous excitation harmonique à l'aide d'absorbeurs non-linéaires multiples en parallèle 11:30

Bastien Vaurigaud, Cerema Sud-Ouest, Département Infrastructures, Bordeaux

Le contrôle vibratoire passif par absorbeur non linéaire (NES) ou assemblages d'absorbeurs non linéaires en parallèle permet de contrôler les vibrations des structures afin de réduire leur sollicitation en fatigue, leur inconfort ou encore leur risque de ruine en cas de choc, vent violent ou séisme. La présentation s'attachera à détailler le dimensionnement d'absorbeurs non linéaires pour le contrôle d'une structure multi-portique linéaire en régime forcé. Les performances d'un absorbeur simple et de deux absorbeurs en parallèle seront comparées. Des résultats analytiques et numériques seront présentés. Enfin une expérimentation sur une maquette à échelle réduite permettra d'évaluer l'approche de dimensionnement et comparer l'efficacité des deux configurations.

Dimensionnement d'absorbeurs d'énergie non linéaires pour le contrôle des vibrations des câbles

11:50

Mathieu Weiss, Ministère de l'Environnement de l'Énergie et de la Mer, Service technique des remontées mécaniques et des transports guidés, Saint-Martin-d'Hères.

Les câbles, comme éléments structuraux élancés et légers, sont utilisés dans nombreux ouvrages, des ponts suspendus aux remontées mécaniques en passant par les ponts haubanés, les bâtiments, les tours de communications, etc. Sous différentes sollicitations, ils peuvent vibrer, ce qui provoque des problématiques de bruit, d'inconfort ou même une usure accélérée. L'utilisation d'absorbeurs d'énergie non linéaires permet de ramener rapidement ces vibrations sous un seuil en régime transitoire ou de les maintenir sous ce seuil en régime forcé. La démarche de dimensionnement sur un exemple à échelle 1 de câble horizontal est présentée.

Applications prototypes d'absorbeurs d'énergie non linéaires dans l'automobile

12:10

Zoran Dimitrijevic, Stellantis Vélizy

Suite à l'émergence des puits d'énergie dans la littérature dans les années 2000, Stellantis a saisi l'opportunité d'utiliser ce concept afin d'élargir l'efficacité d'absorbeurs vibratoires/acoustique et de diminuer leur impact sur le véhicule. Des travaux en collaborations avec les laboratoires de l'ENTPE et du LMA ont permis de développer d'une part un absorbeur dynamique de la torsion de caisse de véhicule cabriolet et d'autre part un absorbeur acoustique pour diminuer le bruit de bouche de moteur à combustion. On présente ici ces 2 applications.

12:30 - 14:30 : Repas

17 octobre 2024— Après-Midi

14:30 - 16:30 : Dynamique non lisse

Backstepping control and NES: few thoughts on couplings in Automatic Control and in Nonlinear Dynamics

14:30

Bernard Brogliato, INRIA Genobles Alpes

Dans cet exposé nous tenterons d'établir un petit pont entre deux techniques de commande qui reposent entièrement sur les couplages entre deux (ou plus) systèmes dynamiques. D'une part la technique dite de backstepping très connue en Automatique pour la commande de systèmes dits "triangulaires". D'autre part les couplages cubiques ou autres utilisés dans les Nonlinear Energy Sinks, que Claude Lamarque a beaucoup étudiés dans sa riche carrière.

Temps de premier retour pour un système avec impacts à N-ddl près d'un mode linéaire rasant

15:00

Stéphane Junca, (LJAD Math., Université Côte d'Azur) ; en collaboration avec Mathias Legrand, (McGill University, Canada), Huong Le Thi (Thang Long University, Vietnam).

Les solutions périodique rasantes sont réputées engendrer une "bifurcation rasante" [Arne Nordmark 1997, 2001], apparition de modes non linéaires et chaos. Cela provient d'une singularité en racine carrée du temps de premier retour de l'application de Poincaré (FRT: first return time). On étudie la dynamique près d'un mode linéaire rasant de période T (GLM: grazing linear mode). Dans ce cas, l'hyperplan de contact va se décomposer en une infinité de domaines où l'orbite reviendra en un temps de l'ordre de $n \cdot T$, avec n entier. En particulier, bien que l'orbite soit continue, la FRT ne l'est pas et devrait entraîner une instabilité près du GLM.

Propagation de fronts dans des chaînes granulaires

15:30

Guillaume James, Grenoble INP, Laboratoire Jean Kuntzmann (LJK), UMR 5224

Les métamatériaux non linéaires ont de nombreuses applications, notamment pour l'absorption des chocs et des vibrations, et leur dynamique met souvent en jeu des phénomènes ondulatoires complexes. Dans cet exposé, nous ferons un focus sur la propagation de fronts de compression dans des métamatériaux granulaires. Les non-linéarités de contact, avec notamment la prise en compte des effets dissipatifs, conduisent dans ce contexte à des modèles fortement non linéaires et non réguliers qui nécessitent le développement de méthodes asymptotiques adaptées.

Modèles élastoplastiques décrits par des inclusions différentielles maximales monotones

15:50

Jérôme Bastien, Université Lyon 1

De ma thèse qu'il a codirigée (avec M. Schatzman) jusqu'à mon HDR où il a été juré, en passant par deux ouvrages publiés ("Systèmes dynamiques discrets non réguliers déterministes ou stochastiques. Applications aux modèles avec frottement ou impact", Hermès Science Publications/Lavoisier, 2012 et "Non Smooth Deterministic or Stochastic Discrete Dynamical Systems. Applications to Models with Friction or Impact" Wiley-ISTE, 2013), Claude Henri-Lamarque m'a permis de modéliser finement des lois élastoplastiques avec un nombre de fini ou infini de degrés de liberté. Reprenant le formalisme d'inclusions maximales monotones, nous avons établi des résultats d'existence et d'unicité ainsi que de convergence de schémas numériques robustes, appliqués dans différents contextes mécaniques.

Equilibres d'un câble non-compressible soumis à des contraintes unilatérales

16:10

Charlérie Bertrand, Arts et Métiers Lille

L'étude et la simulation de structures composées de câbles peut requérir l'utilisation de contraintes unilatérales pour prendre en compte des conditions aux limites variées. Certains systèmes comme les remontées mécaniques, courroies ou assemblage de poulies nécessitent un traitement particulier des zones d'interaction entre le câble et un support. Ces considérations permettent de ne pas limiter l'analyse d'un équilibre à une seule portée mais aussi de réaliser leur intégration temporelle avec des schémas adaptés.

16:30 - 17:00 : Pause

17:00 - 18:00 : Applications

Modes linéaires (!) et milieux acoustiques

Olivier Dazel, Université du Mans

Au début des années 2000, Claude-Henri Lamarque a initié une collaboration avec Franck Sgard, un autre chercheur de l'ENTPE, autour de la modélisation numérique des matériaux acoustiques. Les acousticiens étaient venus à lui car les récents modèles éléments-finis poroélastiques se révélaient être très gourmands en ressources de calcul. Son idée originelle fut de réduire les modèles en étendant la notion de modes complexes. Cette présentation reviendra sur ces travaux, leurs évolutions mais aussi sur des extensions diverses et variées en acoustique des matériaux.

17:00

Résonateurs non linéaires passifs et semi-actifs pour atténuer le bruit

Emmanuel Gourdon, ENTPE/LTDS

Cette présentation s'intéresse à plusieurs applications de résonateurs non linéaires pour atténuer le bruit. Les applications en acoustique vont de résonateurs d'Helmholtz non linéaires passifs à des résonateurs électro-acoustiques non linéaires programmables numériquement. Les travaux effectués en collaboration avec Claude-Henri Lamarque traitent de la conception par des méthodes analytiques jusqu'à des résultats expérimentaux.

17:20

Principes innovants de détection de masse via l'exploitation des non linéarités

Sébastien Baguet, INSA de Lyon / LAMCOS

En raison de leur petite taille et de leur grande sensibilité, les capteurs MEMS résonnants sont d'excellents candidats pour la détection ultrasensible de masse et de force. Depuis une douzaine d'années, en collaboration avec Claude-Henri Lamarque, nous tentons d'améliorer les performances des résonateurs en exploitant des phénomènes non linéaires tels que les bifurcations, les brisures de symétrie, la localisation du mouvement. En particulier, nous verrons comment l'analyse des modes non linéaires et le suivi de bifurcations permet de proposer des principes innovants de détection de masse.

17:40

10:00 - 11:20 : **Session 1: Axes 1 et 2 (Chair : C. Touzé)**

Piezo-elasto-hydrodynamic models for piezoelectric shunt damping of hydrofoils

10:00

Arthur Haudeville (LMSSC, L2EP, LISPEN), Xavier Amandolese (LMSSC), Boris Lossouarn (LMSSC), Christophe Giraud-Audine (L2EP), Olivier Thomas (LISPEN)

This work first investigates the ability of a low order fluid-structure model to fit the vortex-induced vibrations (VIV) observed on a truncated hydrofoil in a hydrodynamic tunnel. A particular VIV area is scrutinized, for which a hydrodynamic excitation mechanism due to a Kármán-type vortex wake organization successively locks the first torsional and second bending mode of the cantilevered hydrofoil. Coupling two structure oscillators with a Van der Pol wake oscillator satisfactorily reproduces the amplitude response and the lock-in frequency. In order to build a low order model allowing to optimize control strategy, a fourth degree of freedom corresponding to the electric circuit of a resonant piezoelectric shunt has been added. Composed of an inductance and a resistance connected to a piezoelectric patch, the passive shunt was tuned to minimize the vibration amplitude in the frequency lock-in range. Model predictions are finally compared with experimental results.

Piezoelectric fluid energy harvesters by monolithic fluid-structure-piezoelectric coupling: a full-scale finite element model

10:15

Runze Zhang (Université Paris-Saclay (UPS), LMEE)

A full-scale finite element model is presented for monolithic fluid-structure interaction (FSI) simulations of thin-walled piezoelectric fluid energy harvesters (PFEH). Unlike widely used beam/plate-based models, our model employs a solid finite element discretization to precisely represent the complex PFEH designs involving microstructured transducers and non-uniform cantilevers. These features, plus the local FSI effects, are often ignored by simplified models. We applied the Galerkin method to formulate the weak form of the mixed equation system, integrating the flow dynamics, the geometrically nonlinear cantilever, the piezoelectric components, the electrode, and the output circuit within a closed-circuit electro-mechanical coupled system within the FEniCS-based TurtleFSI library. We investigated various advanced PFEH features, including the base plate design, the arrangement and microstructure of the piezoelectric components, and their influence on the system's dynamic and energy output behavior. Furthermore, we explored methods to enhance power output of the piezoelectric energy harvesting system in a flowing water environment by incorporating a synergistic vortex generator, consisting of upstream double plates and a downstream cylinder with small spacing. Numerical simulations are adopted to illustrate the synergistic mechanisms, which demonstrate that adjusting the angle of the double plates allows the synergistic vortex generator to produce different wake patterns (double-plate-based type and cylinder-based type), imposing significant effects on the dynamic behavior and power output of the harvester. With suitable angle arrangement, it will result in high-frequency, large-amplitude vibrations of the piezoelectric flag while maintaining a stable power output, which outperforms single vortex generator designs.

Direct parametrisation of invariant manifold with shell finite element: nonlinear dynamics of thin structures using reduc

10:30

Zixu Xia (Université Paris-Saclay (UPS), LMEE)

The Direct Parametrization of Invariant Manifolds (DPIM) has been recently proposed and demonstrated for reduced-order modeling (ROM) of non-autonomous systems, with its initial implementation mainly based on solid finite elements. In this work, we extend the DPIM approach to shell finite elements, which are more suitable for modeling thin structures due to their reduced degrees of freedom and versatile representation of thin, curved geometries. Our implementation aims to combine the DPIM with a 7-parameter solid-shell finite element, offering advantages over classical shell elements by employing three-dimensional constitutive relations, facilitating direct engineering applications, and incorporating Enhanced Assumed Strain (EAS) to prevent Poisson locking. Numerical examples validate the accuracy of this reduced-order model in comparison with the full-scale model based on the Harmonic Balance (HB) method, while exploring nonlinear vibration behavior.

Paramétrisation de variétés invariantes pour problèmes mécaniques : application aux systèmes soumis à une bifurcation de Hopf

10:45

André de F. Stabile (IMSIA, ENSTA Paris), Alessandra Vizzaccaro (Exeter University, UK), Loïc Salles (Université de Liège, Belgique), Alessio Colombo (Politecnico di Milano, Italie), Attilio Frangi (Politecnico di Milano, Italie) et Cyril Touzé (IMSIA, ENSTA Paris)

La méthode de paramétrisation directe des variétés invariantes permet de construire des modèles réduits de taille optimale pour plusieurs classes de systèmes dynamiques. Elle permet de traiter des problèmes de grande taille, provenant par exemple de discrétisations en éléments finis, grâce à une approche directe opérant depuis l'espace physique. Dans cette contribution, nous adaptons la méthode au traitement d'un système paramétré subissant une bifurcation de Hopf. La méthodologie utilisée consiste à ajouter le paramètre de bifurcation aux équations comme une nouvelle variable, de dynamique triviale, et d'utiliser les caractéristiques du système conservatif sous-jacent dans le choix des modes maîtres pour la paramétrisation. Deux exemples d'application sont considérés : le pendule de Ziegler et une poutre soumise à une force suiveuse, traitée avec la méthode des éléments finis. Les diagrammes de bifurcation sur les amplitudes des cycles limites sont reproduits correctement par le modèle réduit pour une gamme modérée de variation du paramètre de contrôle.

11:00 - 11:45 : Pause

11:45 - 12:45 - Session 2: Axes 1 et 3 - (Chair : B. Bergeot)

Etude théorique et expérimentale d'un NES réglable

11:45

Etienne Gourc (LMA), Pierre-Olivier Mattei (LMA), Renaud Côte (LMA), Mattéo Capaldo (Total Energie)

Cette présentation traite du contrôle passif des vibrations à l'aide d'absorbeur non linéaire de type NES appliqué aux éoliennes. Une difficulté associée à ce type d'application est liée à la très basse fréquence du mode à contrôler qui se situe autour du Hertz. Un nouveau design de NES, basé sur une configuration en pendule inversé, capable de fonctionner à de telles fréquences, est proposé. Celui-ci a également la particularité d'être réglable de manière continue et de pouvoir inclure une dissipation non linéaire, permettant de contrôler l'apparition de la résonance détachée. La première partie de ces travaux présente la cinématique associée à ce design de NES ainsi que l'influence des différents paramètres de dimensionnement, notamment sur la variété invariante. La seconde partie présente une réalisation expérimentale sur un modèle réduit d'éolienne dont la fréquence du mode à contrôler avoisine 1.5 Hz. Les résultats expérimentaux confirment les possibilités de réglages du NES, ainsi que les bénéfices apportés par l'amortissement non linéaire.

Bistabilité via flambement : de la statique à la dynamique

Antoine Faulconnier (Lab. Quartz), Apostolos Paliouaios (LAUM), Georgios Theocharis (LAUM), Vassos Achilleos (LAUM), Stéphane Job (Lab. Quartz) and Vincent Tournat (LAUM)

12:00

Ces dernières années, les systèmes bistables, par exemple une poutre flambée, suscitent un intérêt croissant en raison de leur large champ d'applications. Dans le régime quasi-statique, ils constituent par exemple des fusibles mécaniques ou des actionneurs mécaniques en robotique souple. Dans le régime dynamique, ils permettent de concevoir des dispositifs de récupération d'énergie et les puits d'énergie non linéaires (NES). Les systèmes bistables présentent généralement un potentiel à double puits avec un état instable entre deux régions stables. Cela se traduit par une barrière énergétique capable de stocker de l'énergie mécanique. Un tel potentiel est intrinsèquement non linéaire, ce qui conduit à une raideur dépendante de l'amplitude, qui peut même devenir négative.

Dans le contexte du projet ANR ExFLEM (Harnessing extreme wave events in non-linear flexible elastic metamaterials), nous nous intéressons au comportement mécanique d'une poutre flambée constituée d'un matériau souple imprimé en 3D en régimes statique et dynamique. La réponse quasi-statique est déterminée à l'aide d'une machine d'essai de traction-compression pour mesurer la force, le déplacement et l'énergie d'entrée, couplée à une mesure du champ de déplacement par caméra pour déterminer le champ de déformation local de la poutre. Ces deux mesures sont connectées par un modèle de poutre d'Euler-von Kármán, reliant la déformation aux énergies de flexion et de compression. De plus, nous cherchons à décrire le champ de déformation sous la forme d'une décomposition sur les modes de flambage stables et instables. La réponse dynamique, qui se traduit dans le régime faiblement non linéaire par un comportement d'assouplissement typique d'un résonateur de Duffing, est déterminée via une fonction de réponse en fréquence dépendante de l'amplitude à l'aide d'un pot-vibrant et d'accéléromètres. En plus d'une mesure de champ en caméra rapide pour mesurer les déformations locales instantanées de la poutre. Cette dernière permet en particulier de relier les mesures énergétiques statiques et dynamiques.

Analyse de bifurcation d'un modèle minimal d'un instrument à corde frottée

Marc Wijnand (LAUM), Soizic Terrien (LAUM), Frédéric Ablitzer (LAUM), Sylvain Maugeais (LAUM,LMM)

12:15

Cette étude vise à obtenir une cartographie des différents régimes d'un instrument à corde frottée tel le violon, qui correspondent à différents modes de jeu de l'instrumentiste, par l'intermédiaire de la continuation numérique et expérimentale. Est étudié un modèle minimal d'un instrument à corde frottée, obtenu comme une décomposition modale de l'EDP des ondes linéaire sur une corde qui subit une force de friction de Coulomb en un point. Ce modèle non régulier peut être régularisé pour des raisons de conditionnement lors de la continuation numérique en suivant deux paramètres de contrôle (vitesse et force de l'archet). Le diagramme de bifurcation ainsi obtenu pour le modèle à 1 mode contient deux courbes de bifurcations de Hopf et une courbe de bifurcations de type saddle node. En réduisant le taux de régularisation, le diagramme se rapproche du diagramme de bifurcation du système correspondant non régularisé (loi de Coulomb) obtenu par des simulations temporelles par une méthode numérique dédiée. La continuation numérique du modèle à 2 modes donne un diagramme de bifurcation dense, présentant plusieurs types de formes d'onde, correspondant p.ex. à des bifurcations tore ou des doublements de période. Finalement, un dispositif pour la continuation expérimentale sous construction est présenté.

Calcul de bassin d'attraction de solutions périodiques pour un modèle 4D de saxophone

Thomas Passa (LAUM), Soizic Terrien (LAUM), Sylvain Maugeais (LAUM,LMM), Bruno Gazengel (LAUM)

12:30

La dynamique d'un modèle simple d'instrument de musique à anche, écrit comme un système de quatre équations différentielles ordinaires, est étudiée. Une analyse de bifurcation est réalisée en considérant la pression de souffle – principal paramètre de contrôle pour le musicien – comme paramètre de bifurcation. Cette analyse révèle que plusieurs solutions périodiques stables, correspondant à différentes notes musicales, coexistent sur une même plage de pression de souffle. Des techniques de machine learning (Explicit Design Space Decomposition et Support Vector Machine) sont utilisées pour construire, dans un sous-espace 3D bien choisi de l'espace des phases, la frontière entre les bassins d'attraction des solutions périodiques. Les bassins présentent un intérêt particulier d'un point de vue pratique, car ils sont liés à la jouabilité des régimes ainsi qu'à leur sensibilité aux perturbations.

12:45 - 14:45 : Repas

14:45 - 16:15 **Session 3 - Axe 3 - (Chair : S. Baguet)**

Jusqu'où pousser la non-régularité en dynamique transitoire explicite ?

David Dureisseix (INSA Lyon, LaMCsO), Paul Larousse (MFP Michelin, INSA Lyon), Anthony Gravouil (INSA Lyon, LaMCoS), Jean Di Stasio (MFP Michelin)

14:45

Pour les problèmes de dynamique transitoire non-réguliers (impacts, ruptures...), l'usage de schémas explicites est intéressant pour un traitement efficace de la résolution. Néanmoins, les méthodes de pénalisation peuvent poser un problème vis-à-vis de la stabilité, par le pas de temps critique qui se réduit d'autant plus que la pénalisation est forte, ainsi que de l'usage de paramètres numériques ad hoc non physiques. Assez récemment, le traitement de la non-régularité avec l'approche de J. J. Moreau (formulation en vitesse-impulsion) a été intégrée à un schéma de type différence centrée, conduisant au schéma explicite symplectique CD-Lagrange. L'objectif ici est de montrer la faisabilité de l'intégration de non-régularités fortes dans ce schéma, en conservant au maximum la modularité de l'approche, et le caractère explicite "matrix-free" (dans le cas de maillages compatibles). Les non-régularités sont poussées au maximum pour tester l'approche, vis à vis de sa faisabilité et de sa robustesse: on se concentrera ici sur le comportement non-régulier d'interfaces (impacts parfaitement plastiques, parfaitement fragiles, avec adhésion récupérable...). Les cas tests présentés pourront aussi servir de benchmarks pour tester la faisabilité d'autres approches.

Computational methods for whirl flutter analysis of urban air mobility vehicles

Charles Jacquet, Camille Denoël, Loïc Salles (Département d'aéronautique et mécanique, Université de Liège)

15:00

The rise of Electric Vertical Take-Off and Landing (E-VTOL) vehicles, driven by the demand for fast urban transport, emphasizes the need to understand and mitigate aeroelastic instabilities like whirl-flutter, particularly in designs with distributed electric propulsion systems. Historically, whirl-flutter has caused catastrophic failures, highlighting the need for comprehensive analysis in modern aircraft designs.

The objective of this work is to develop a comprehensive computational model using the Finite Element Method to fully capture the dynamics between rotating, expressed in a floating frame of reference, and stationary parts of a structure, enabling a more accurate study of the whirl-flutter phenomenon. This analysis is conducted using the Floquet theory to study the stability of the system, particularly in a fixed-rotating frame of reference. The model includes an innovative time-dependent mechanical coupling strategy for the mass, gyroscopic, and centrifugal stiffness structural matrices therefore fully preserving the dynamics of the structure. The methodology involves the validation of various finite element matrices and components derived from 3D beam elements, followed by the implementation of time-dependent coupling between rotating and stationary components. The developed model is applied to a wing-propeller structure, illustrating its capability to work on complex geometry structures.

The results show that the partial coupling, specifically the coupling between translational degrees of freedom of rotating structures and those of stationary structure at the hub, is successfully validated. However, it is demonstrated that the Newmark integration scheme does not provide consistent results, highlighting the need for alternative approaches for accurate time integration. This partial success demonstrates the potential of the developed model as a tool for accurately capturing critical dynamics in whirl-flutter analysis, contributing to the design and certification of future urban air mobility vehicles.

Computing the dynamics of periodic waveguides with nonlinear boundaries using the Wave Finite Element Method

15:15

Vincent Mahé (Inria Rennes), Adrien Mélot (Inria Rennes), Benjamin Chouvion (CREA), Christophe Droz (Inria Rennes)

Structures constituted of assembled sub-components are often subjected to nonlinear effects due to the presence of joints or contacts, which can induce higher-order harmonics of the source excitation. In the context of periodic structures, these nonlinearities cannot be tackled using the Floquet-Bloch theory in its usual harmonic formulation. This study presents an extension of the Wave Finite Element Method (WFEM), which combines the Floquet-Bloch theory and the Finite Element Method, to compute the dynamics of periodic waveguides with nonlinear boundaries. This wave-based approach reduces the dynamics of the whole waveguide to that of a single unit-cell, thereby significantly improving the computational efficiency. The Harmonic Balance Method is used to recast the governing equations into a nonlinear algebraic system, which can then be solved using numerical continuation algorithms. To demonstrate the validity and benefit of this approach, the predictions derived from the proposed methodology are compared to results obtained through conventional Finite Element analysis. Excellent agreement and a notable reduction in computational cost are observed.

Ground Vibration Testing with phase-locked loop control for the identification of nonlinear vibratory behaviour

15:30

Augustus Chukwu (ONERA, IMSIA/ENSTA Paris), Cyrille Stephan (ONERA), Cyril Touzé (IMSIA/ENSTA Paris), Olivier Doaré (IMSIA/ENSTA Paris)

Ground vibration testing (GVT) is a required experimental procedure for mechanical system identification. Dynamic parameters: modal mass, frequency, damping, and mode shape, are identified by this technique which are useful for the calibration of aeroelastic models. The structure is excited at different frequencies, and from the response, information about its dynamics can be extracted. GVT is a standard procedure in the aerospace industry, requiring high measurement precision and accuracy. Though rich in resources or tools for linear system identification, it lags in comparison to nonlinear system identification. Current GVT tools rely on manual operation and top expertise which pose a challenge in terms of testing time and available know-how. Currently, research is focused on developing methods that automate the identification process and ease the duration of testing. Among these methods are: the control-based continuation (CBC) and Phase-Locked Loop (PLL) methods.

Phase-locked loop testing is one of the recent control-based techniques currently under research for identifying nonlinear structures. It is a useful tool for experimental extraction of nonlinear normal modes. Relying on feedback of the phase, the PLL automates the well-known phase resonance method provided it is tuned correctly. One advantage of PLL testing over other methods is the testing speed once correct control gains are found. Like any other control-based method, obtaining the right control gains is largely heuristic which in turn will increase testing time and can induce structural fatigue. We present a variation of the PLL that requires the control of just one parameter, greatly reducing the tuning effort. A method to systematically determine this parameter's value is also presented, making the proposed design less heuristic. Numerical and experimental results validate the speed and robustness of the new design, demonstrating its advantage over the conventional design.

Our objective at ONERA is to extend the potential of the phase-locked loop method to identify aircraft structures.

Recalage d'un modèle de substitution en dynamique stochastique non linéaire avec données partielles : application aux tuyères aérospatiales

15:45

Evangéline Capiez-Lernout (UGE, MSME), Olivier Ezvan (UGE, MSME), Christian Soize (UGE, MSME)

Dans cette recherche, une méthodologie visant à identifier un modèle de substitution vis à vis de données incomplètes dans le cadre de la dynamique non linéaire stochastique est appliquée au contexte d'une tuyère aérospatiale. Cette dernière est une structure mince, composée d'un matériau homogénéisé élastique incertain, et est soumise à un jet de pression stochastique pour lequel la structure entre dans un domaine de vibration non-linéaire. Des données expérimentales partielles concernant les déplacements normaux transverses en sortie de tuyère sont disponibles en un nombre limité de points.

Un modèle numérique non linéaire stochastique, paramétré par des variables contrôlées et dépendant de variables non contrôlées, est construit finement pour simuler la dynamique de la tuyère. Un tel modèle est d'abord utilisé sans variables non contrôlées et pour des paramètres de contrôle fixés, afin de générer des quantités d'intérêt correspondant à un petit ensemble de données cibles. Il est ensuite utilisé avec des paramètres de contrôle et des variables non contrôlées incertaines pour constituer un jeu de données d'entraînement de taille limitée.

L'algorithme PLoM, s'appuyant sur une approche purement probabiliste, est adapté pour prendre en compte dans le processus de recalage les contraintes liées aux données cibles incomplètes. Il donne lieu à un modèle de substitution recalé, reproduisant un comportement vibratoire non linéaire proche de la réponse cible, et ce malgré les incertitudes et le caractère partiel des données.

Systèmes aléatoires impacteur-impactés : une description par chaos polynomiaux

16:00

Biswarup Bhattacharyya (ITT Hyderabad, India), Eric Jacquelin (LBMC), Denis Brizard (LBMC)

Dans le contexte de la sécurité routière, la conception de dispositifs de sécurité nécessite de faire tourner des calculs assez longs, compte-tenu des phénomènes non-linéaires sous-jacents. C'est particulièrement vrai lorsqu'on simule des crashes test, ou d'autres essais d'impact (exemple : certification de casques de moto). Or de nombreux paramètres intervenant dans ces conceptions sont très souvent incertains. Ces incertitudes peuvent être modélisées par des variables (ou vecteurs ou matrices) aléatoires. De ce fait, les quantités de sortie sont également des variables aléatoires, dont il est important de déterminer leur distribution si possible, ou, à défaut, de déterminer des caractéristiques statistiques (moyenne, écart-type par exemple).

La méthode de référence pour effectuer ces propagations d'incertitude consiste à faire tourner des simulations de Monte Carlo (MCS). Toutefois la méthode MCS nécessite de faire tourner un très grand nombre de simulations, ce qui peut être en pratique infaisable dans le cas de calculs de crash par exemple. Il s'avère alors intéressant d'utiliser des modèles de substitution (méta-modèles), comme par exemple une approximation de la réponse aléatoire par développement en chaos polynomiaux (PCE). Toutefois, cela nécessite dans un premier d'identifier le méta-modèle. En ce qui concerne les PCE, les méthodes non intrusives sont souvent efficaces pour les systèmes non linéaires mais elles nécessitent d'avoir assez de données pour l'identification satisfaisante du PCE. Une fois le méta-modèle obtenu et validé, on peut alors le faire tourner sur des simulations de MC, ce qui est très rapide car cela consiste à évaluer numériquement des polynômes. On obtient ainsi une estimation d'un très grand nombre de valeurs d'un paramètre de sortie du modèle initial et donc de caractéristiques statistiques de ces réponses.

Il peut a priori sembler difficile de prédire correctement des grandeurs issues d'impacts entre structures. Aussi, dans un premier temps, cette méthode est testée sur une structure constituée d'un système masse-ressort ; la structure est impactée par un projectile ayant une vitesse initiale donnée. L'interaction entre les masses se fait via un ressort non-linéaire de contact. Les paramètres aléatoires sont la vitesse initiale du projectile, la raideur caractérisant le ressort de contact et la masse du projectile. On s'intéresse à la vitesse du projectile, au déplacement de la masse, ainsi qu'à la force de contact. L'objectif est non seulement de reconstruire les deux 1ers moments statistiques de ces grandeurs, mais également de prédire l'évolution de ces grandeurs pour des valeurs données des paramètres aléatoires. Dans un second temps on s'intéresse à un exemple plus industriel : il s'agit d'un élément de sécurité routière qui est impacté et qu'on décrit également à l'aide d'un méta-modèle PCE.