

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

9 - 10 novembre 2023

Amphithéâtre Jean-Jacques Gagnepain, FEMTO-ST
Besançon

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)
 Olivier THOMAS (ENSAM LISPEN)
 Cyril TOUZÉ (ENSTA Paris - IMSIA).

Programme

9 novembre 2023 — Matin	6
9:00 - 9:30 : Accueil Café	6
9:30 - 10:00 : Introduction, Présentation du GdR	6
10:00 - 10:45 : Conférence plénière , B. Lossouarn (CNAM Paris) - Amortissement de résonances non linéaires par couplage piézoélectrique	6
10:45 - 11:15 : Pause	6
11:15 - 12:15 - Session 1 : Axe 2 - Maîtrise des couplages (Chair : B. Lossouarn)	6
11h15-11h30 : Liwaa Abou Chakra (UPFH), Analyse multiparamétrique du comportement magnéto-vibro-acoustique de moteurs électriques	6
11h30-11h45 : Hugo Fayolle (ENSAM), Optimisation d'un récupérateur d'énergie vibratoire piézoélectrique direct et paramétrique avec non-linéarités géométriques	6
11h45-12h00 : Floriane Peyrouse (INSA Lyon), Estimation expérimentales du coefficient de couplage d'un transducteur piézoélectrique non linéaire	7
12h00-12h15 : Olivier Thomas (ENSAM), A Nonlinear Piezoelectric Shunt Absorber with 2:1 Internal Resonance	7
12:15 - 14:00 : Repas	8
9 novembre 2023 — Après-Midi	9
14:00 - 14:45 : Conférence plénière , M. Haragus (FEMTO-ST) - Méthodes de réduction en dynamique non linéaire: variétés centrales et formes normales	9
14:45 - 15:45 - Session 2 : Axe 3 - Méthodes d'analyse de systèmes non-linéaires (Chair : C. Touzé)	9
14h45-15h00 : Aurélien Grolet (ENSAM), Computing Normal Forms of Quadratic DAE	9
15h00-15h15 : Gaëtan Kerschen (Université de Liège), Resonant phase lags of nonlinear mechanical systems	9
15h15-15h30 : Adrien Mélot (INRIA), Optimisation structurelle pour le contrôle de bifurcations	9
15h30-15h45 : Marielle Debeurre (ENSAM), Dynamique non linéaire de structures élancées hautement flexibles : calcul des modes non linéaires avec une stratégie éléments finis dans le domaine fréquentiel	9
15:45 - 16:15 : Pause	10
16:15 - 17:45 - Session 3 : Axe 3 - Méthodes d'analyse de systèmes non-linéaires & Axe 1 - Exploitation et Modélisation des Non-Linéarités (Chair : C-H. Lamarque)	10
16h15-16h30 : Lisa Fournier (ISAE) , Modélisation et analyse expérimentale du comportement dynamique d'équipements aérospatiaux attachés via un système d'attaches repositionnables	10

16h30-16h45 : Sébastien Talik (CEA Cesta), Réponses vibratoires non linéaires d'un assemblage industriel à une excitation aléatoire, multipoints et corrélée : essais, modélisations et simulations	10
16h45-17h00: Jean Flosi (ENTPE), Interactions intermodales dans une chaîne d'oscillateurs non linéaires de type masses imbriquées	11
17h00-17h15: Arthur Barbosa (FEMTO-ST), Nonlinear standing wave formation in damped oscillator chains	11
17h15-17h30: Maxime Morell (ENTPE), Création d'absorbeurs électroacoustiques à divers comportements non linéaires	11
17h30-17h45: Adrien Pelat (Université du Mans), Réduction vibratoire large bande par combinaison de l'effet Trou Noir Acoustique et de non-linéarités de contact	12
10 novembre 2023 — Matin	13
9:00 - 9:15 : Accueil Café	13
9:15 - 10:00 : Conférence plénière , M. Defoort (TIMA) - Chaos in micro-mechanics: towards MEMS-based secured communications	13
10:00 - 11:00 - Session 4 : Axe 1 - Exploitation et Modélisation des Non-Linéarités (Chair : M. Defoort)	13
10h00-10h15 : Kevin Dekemele (Université de Gent), Un absorbeur NES piézoélectrique composé d'une source tension non linéaire : théorie et expériences	13
10h15-10h30 : Etienne Gourc (LMA), Prise en compte de l'amortissement non linéaire dans le dimensionnement d'un NES	13
10h30-10h45 : Clément Raimond (ISAE), Conception théorique, simulation numérique et mise en œuvre expérimentale d'un NES pneumatique	13
10h45-11h00 : Pierre Olivier-Mattei (LMA), Étude numérique et expérimentale d'un NES vibroacoustique bistable	14
11:00 - 11:30 : Pause	14
11:30 - 12:30 - Session 5: Axe 1 - Exploitation et Modélisation des Non-Linéarités (Chair : E. Sadoulet-Reboul)	14
11h30-11h45 : Louis Mesny (INSA Lyon), Un absorbeur de vibration hybride avec pilotage des non-linéarités	14
11h45-12h00 : Arthur Givois (UTC), Mise en oeuvre et analyse d'un absorbeur vibro-acoustique non linéaire par continuations expérimentale et numérique	14
12h00-12h15 : Baptiste Bergeot (INSA CVL), Atténuation passive de vibrations auto-entretenues au moyen d'un absorbeur dynamique non linéaire bistable	15
12h15-12h30 : Roberto Alcorta (INSA Lyon), Absorbeurs non linéaires pour le contrôle passif des instabilités aéroélastiques des drones à ailes très flexibles	15
12:15 - 14:00 : Repas	16
10 novembre 2023 — Après-Midi	17
14:00 - 15:00 - Session 6 : Axe 1 - Exploitation et Modélisation des Non-Linéarités & Axe 3 - Méthodes d'analyse de systèmes non-linéaires (Chair : O. Thomas)	17
14h00-14h15 : Loïc Le Marrec (Université de Rennes), Poutres et rubans soumis à des couples purs	17
14h15-14h30 : Alvaro Anzoleaga Grandi (ENSAM), New physical insights in passive dynamical stabilization	17
14h30-14h45 : Soizic Terrien (Université du Mans) , Bassins d'attraction dynamiques dans un modèle simple d'instrument de musique auto-oscillant	17
14h30-14h45 : Jesus Garcia Perez (University of Michigan), Approche Hybride Intégrant Données et Physique pour la Prédiction des Bifurcations dans les Systèmes Dynamiques	17

Bienvenue à Besançon et à l'Institut FEMTO-ST

Présentation de Besançon (source Grand Besançon Métropole, <https://www.besancon-tourisme.com>)

Ville nature, ville de l'innovation et de la précision, ville universitaire, Besançon et son agglomération allient développement harmonieux et qualité de vie préservée. Ici tous les ingrédients sont réunis, une nature omniprésente, une histoire et un patrimoine préservé, des savoir-faire uniques et un dynamisme économique porteur d'avenir. Forte d'une agglomération regroupant 68 communes et 193 279 habitants, Besançon s'est développée dans un site privilégié, lovée dans un méandre du Doubs fermée par un éperon rocheux lui-même couronné par la majestueuse Citadelle de Vauban inscrite avec l'ensemble des fortifications de Vauban qui entourent et dominent la vieille ville au Patrimoine mondial de l'UNESCO depuis juillet 2008.

Ville de l'innovation, Besançon est pôle européen des microtechniques, du génie biomédical et pôle mondial temps fréquence. Ses industries de pointe s'appuient sur la micromécanique et les microtechniques, l'électronique, l'horlogerie à quartz et la robotique. Ecrin de verdure enserré d'une rivière, au cœur de sept collines, entourée de forêts, Besançon est un véritable "poumon vert" propice aux promenades et aux randonnées sportives. Car la ville vit intensément à l'heure du sport, et s'inscrit comme l'un des pôles régionaux des pratiques outdoor.



Présentation de FEMTO-ST <https://www.femto-st.fr>



L'institut FEMTO-ST (Franche-Comté Electronique Mécanique Thermique et Optique – Sciences et Technologies, UMR 6174), est une unité mixte de recherche, placé sous la tutelle principale du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et de l'Université Bourgogne Franche-Comté (UBFC) ainsi que de l'Université de Franche-Comté (UFC), de l'École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques (SUPMICROTECH-ENSMM) et de l'Université de Technologie Belfort-Montbéliard (UTBM).

Il compte aujourd'hui plus de 750 membres, départements scientifiques, services communs et direction confondus et est divisé en sept départements

- Automatique et Systèmes Micro-Mécatroniques - AS2M
- Informatique et Systèmes Complexes - DISC
- Energie
- Mécanique Appliquée - DMA
- Micro Nano Sciences et Systèmes - MN2S
- Optique
- Temps-Fréquence - TF

La stratégie de l'Institut : développer une recherche scientifique d'excellence avec un impact socio-académique et socio-économique fondée sur une dynamique collective et responsable. La spécificité de FEMTO-ST est d'associer les Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication (STIC) avec les Sciences pour l'Ingénieur (SPI). Son champ thématique couvre en effet l'optique, l'acoustique, les micro nanosciences et systèmes, le temps-fréquence, l'automatique, l'informatique, la mécatronique, en

même temps que la mécanique et les matériaux, l'énergétique et le génie électrique. Les actions de recherche de FEMTO-ST peuvent être fondamentales ou appliquées, et produisent régulièrement un impact socio-économique, dans des secteurs comme l'énergie et les transports, la santé, les télécommunications, le spatial, l'instrumentation et la métrologie, l'horlogerie, l'industrie du luxe.

Quelques informations pratiques

Accès au bâtiment

Le bâtiment est en accès ZRR (Zone à Régime Restrictif). Il faut donc demander l'entrée dans le bâtiment via l'interphone à l'entrée du bâtiment.

Repas du midi

Les repas seront pris avec présentation de la contremarque fournie au restaurant Lumière (Plan donné sur la figure 1).

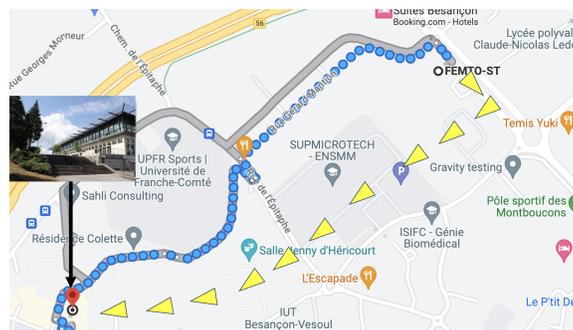


Figure 1: Accès au restaurant Lumière depuis FEMTO : Traverser le parking Relais, puis le parking du DMA et de l'ENSMM, passer au travers des résidences universitaires pour accéder au restaurant (15 à 20 min).

Accès WIFI

L'accès se fait avec EDUROAM ou sur inscription (voir organisateurs).

Repas du jeudi soir

Le repas se déroulera dans la chapelle Saint Etienne au sein de la Citadelle (Figure 2). L'accueil se fera à partir de 19h dans la chapelle.

L'accès à la Citadelle se fait avec la Ligne 6 depuis TEMIS (Lignes GINKO) - descendre à l'arrêt Victor Hugo puis finir à pieds (environ 13 minutes, montée via des escaliers puis dénivelé). Pour un accès en voiture, les voitures des participants stationnent sur le parking visiteur extérieur payant.



Figure 2: Chapelle Saint Etienne, Citadelle de Besançon



9 novembre 2023 — Matin

9:00 - 9:30 : Accueil Café

9:30 - 10:00 : Introduction, Présentation du GdR

10:00 - 10:45 : **Conférence plénière, B. Lossouarn (CNAM Paris) - Amortissement de résonances non linéaires par couplage piézoélectrique**

10:45 - 11:15 : Pause

11:15 - 12:15

Session 1 : Axe 2 - Maîtrise des couplages (Chair : B. Lossouarn)

Analyse multiparamétrique du comportement magnéto-vibro-acoustique de moteurs électriques

11:15

Liwaa Abou Chakra (UPFH)

Les machines électriques sont utilisées dans de nombreux domaines allant de la mobilité à l'industrie en passant par les applications domestiques. Leur nombre ne cesse de croître à la fois en termes de volume et de gamme. Au cours des dernières décennies, de nombreux progrès ont été effectués principalement orientés vers l'amélioration de l'efficacité énergétique et de la compacité de manière à limiter l'impact environnemental. Toutefois, un problème majeur reste lié aux émissions sonores prépondérantes, qui sont un enjeu de santé public. Les vibrations et le bruit peuvent dans ce domaine avoir des origines mécanique, aérodynamique et électromagnétique. Le dimensionnement de ces machines au sens large (moteur, transformateur...) est une tâche rendue complexe, notamment par la nature multi-physique de ces systèmes. De plus, les différentes variabilités de tels systèmes sont susceptibles de modifier leur comportement vibro-acoustique. L'utilisation d'une approche tout numérique (modèles élément finis à la fois en électromagnétique et en vibro-acoustique) permet de prendre en compte les effets 3D et l'environnement mécanique complet de la machine électrique (et pas seulement le stator) pour étudier l'effet de la propagation des vibrations sur l'ensemble des composants de la machine électrique. Cependant, leur mise en œuvre est souvent très lourde en termes de temps de calcul et de ressource mémoire. Le travail proposé porte sur le développement et la validation de modèles numériques réduits capables de représenter de manière intégrée le comportement dynamique de systèmes magnéto-mécaniques, en capacité d'intégrer des variations paramétriques.

Optimisation d'un récupérateur d'énergie vibratoire piézoélectrique direct et paramétrique avec non-linéarités géométriques

11:30

Hugo Fayolle (ENSAM)

Les récupérateurs d'énergie vibratoire ont pour objectif de transformer l'énergie vibratoire issue d'une source externe en énergie électrique. Ils pourraient prendre la place de batteries dans l'alimentation de certains petits systèmes électroniques. Ces récupérateurs d'énergie sont composés d'un résonateur mécanique, d'un transducteur électromécanique et d'un circuit électrique relié au transducteur. Dans notre cas, le système consiste en une poutre fine sur laquelle sont collés des patches piézoélectriques reliés à une résistance. Tout le jeu étant de récupérer un maximum d'énergie électrique dans une situation donnée, de nombreux axes de recherche ont vu le jour. L'un d'entre eux est l'introduction de non-linéarités dans le système. Ainsi, on se concentre ici sur l'utilisation de l'excitation paramétrique et de non-linéarités géométriques à travers des oscillations en grande amplitude. L'excitation paramétrique consiste, dans notre cas, à exciter la poutre selon son axe à deux fois sa fréquence d'oscillation (contrairement à l'excitation directe qui est transverse et de même fréquence). En se servant d'un modèle de poutre stratifiée en grande rotation associée à une loi de comportement piézoélectrique, l'objectif est de comparer le comportement et les performances du système théorique dans le cas d'une excitation paramétrique et direct, en grande amplitude.

Estimation expérimentales du coefficient de couplage d'un transducteur piézoélectrique non linéaire

11:45

Floriane Peyrouse (INSA Lyon)

Dans le cas de résonateurs piézoélectriques comprenant une non-linéarité mécanique, la question de la définition du coefficient de couplage se pose. L'estimation du coefficient de couplage piézoélectrique est essentielle pour l'optimisation et le dimensionnement des transducteurs. Dans le cas linéaire, différentes définitions et méthodologies coexistent et sont équivalentes pour caractériser le couplage. La plupart de ces méthodes reposent sur la différence de comportement entre les configurations circuit ouvert (CO) et court-circuit (CC). Parmi elles, la formulation énergétique peut être mise en œuvre via la réalisation d'un cyclage quasi-statique chargement-déchargement au cours duquel la configuration électrique varie. La formulation fréquentielle repose quant à elle sur des études dynamiques permettant d'identifier les fréquences propres du système en CO et en CC. On s'intéresse ici à un transducteur comprenant une non-linéarité géométrique couplée à des éléments piézoélectriques. La validité et l'équivalence des différentes formulations dans le domaine linéaire sont alors remises en cause. Le comportement des systèmes non linéaires dépend de l'amplitude de sollicitation, il peut donc être supposé que le coefficient de couplage varie également en fonction de l'amplitude de la structure. Pour déterminer la formulation, et donc la méthodologie, la plus adaptée pour définir le coefficient de couplage d'un résonateur non linéaire, les approches énergétique et fréquentielle sont implémentées expérimentalement. Une lame bi-encastree sertie de deux céramiques piézoélectriques est employée comme prototype expérimental. Des cyclages statiques et des réponses à des sinus balayés en CO et en CC sont réalisés pour différents niveaux d'amplitude afin de comparer et questionner les résultats obtenus.

A Nonlinear Piezoelectric Shunt Absorber with 2:1 Internal Resonance

12:00

Olivier Thomas (ENSAM)

We present a theoretical and experimental analysis of a new nonlinear piezoelectric shunt absorber designed to attenuate the vibration of an elastic structure under external excitation. This absorber is formed by connecting the elastic structure via a piezoelectric patch to an electrical shunt circuit consisting of a resonant shunt combined in series with a nonlinear voltage component, that includes a quadratic and a cubic components, and with its natural frequency tuned to half that of the target mechanical mode. As a consequence, a two to one internal resonance occurs, generating a strong coupling between the mechanical mode and the electrical mode that leads to the creation of a nonlinear antiresonance that replaces the mechanical resonance of the elastic structure. The antiresonance amplitude is also subjected to a saturation, thus becoming independent of the input amplitude and giving this absorber an advantage over the standard linear absorbers. The presentation will describe the shunt circuit and its optimization, its main quadratic voltage component, and the use of the normal form theory to adjust the value of the cubic component, necessary to improve the performance of the absorber.

12:15 - 14:00 : Repas

9 novembre 2023 — Après-Midi

14:00 - 14:45 : **Conférence plénière, M. Haragus (FEMTO-ST) - Méthodes de réduction en dynamique non linéaire: variétés centrales et formes normales**

14:45 - 15:45

Session 2 : Axe 3 - Méthodes d'analyse de systèmes non-linéaires (Chair : C. Touzé)

Computing Normal Forms of Quadratic DAE

Aurélien Grolet (ENSAM)

14:45

Dans ces travaux, on présente l'application du calcul de la forme normale à des systèmes algébro-différentielle (DAE) avec non-linéarités quadratiques. Bien que restrictif en apparence ces types de système sont à même de représenter une grande classe de systèmes dynamiques, et sont à la base du formalisme utilisé dans le logiciel MANLAB. On présente également une méthode permettant d'estimer le domaine de validité du développement en forme normale. Des exemples d'applications sont utilisés pour illustrer la méthode et valider les résultats.

Resonant phase lags of nonlinear mechanical systems

Gaetan Kerschen (Université de Liège)

15:00

With the objective to exploit phase-locked loops for nonlinear modal analysis testing, this presentation discusses the phase lag exhibited by nonlinear systems in the vicinity of primary and secondary (i.e., superharmonic, subharmonic and ultrasubharmonic) resonances. Single-degree-of-freedom systems featuring polynomial stiffness are first investigated. The case of multi-degree-of-freedom systems is then analyzed. Results obtained on an experimentally nonlinear beam confirm the theoretical findings.

Optimisation structurelle pour le contrôle de bifurcations

Adrien Mélot (INRIA)

15:15

La demande toujours croissante de structures plus légères et de systèmes plus efficaces nécessite que les effets des non-linéarités soient pris en compte dès le stade de la conception. L'une des caractéristiques les plus notables qui distingue les systèmes non linéaires de leurs homologues linéaires est le phénomène de bifurcation. Lorsqu'un paramètre est modifié, par exemple la fréquence de forçage, une bifurcation peut se produire, entraînant des réponses qualitativement différentes telles que des oscillations quasi-périodiques ou chaotiques. L'analyse des bifurcations, qui vise à prédire et à étudier de tels phénomènes, est un domaine de recherche en plein essor. Des recherches récentes ont porté sur le calcul de la stabilité des solutions périodiques ou sur l'analyse paramétrique des points de bifurcation. Cependant, très peu d'études ont tenté d'optimiser les paramètres structurels d'un système mécanique pour qu'il présente des bifurcations à des positions souhaitées et jamais dans le contexte de vibrations non linéaires. Dans ce travail, nous développons un formalisme d'optimisation basé sur la méthode de l'équilibre harmonique (HBM), qui est largement utilisée dans la communauté des vibrations non linéaires. La formulation de la fonction objectif repose sur une mesure de bifurcation formulée via une technique de bordurage et une analyse de stabilité de Hill et permet de traiter simultanément plusieurs bifurcations sans que deux d'entre elles ne se trouvent à la même position.

Dynamique non linéaire de structures élancées hautement flexibles : calcul des modes non linéaires avec une stratégie éléments finis dans le domaine fréquentiel

15:30

Marielle Debeurre (ENSAM)

La dynamique des poutres élancées flexibles en grand déplacement telles que les câbles, les tuyaux, les fibres et les réglets représente un sujet de recherche très pertinent dans le domaine de la mécanique. La dynamique non linéaire de ces structures se révèle très complexe à cause des non linéarités géométriques liées aux termes de rotation trop importantes pour être simplifiées. Dans le cadre de la dynamique des poutres flexibles en trois dimensions, on parle souvent de diverses méthodes pour paramétrer les termes de rotation : angles d'Euler, groupes de Lie, quaternions, etc. Dans cette présentation, nous présenterons une méthode pour la simulation de systèmes de poutres flexibles basée sur le modèle de poutre géométriquement exact avec quaternions discrétisé en élément finis (EF) et résolu entièrement dans le domaine fréquentiel. L'implémentation de ce modèle dans un code EF et plusieurs exemples à partir de cas tests dans la littérature seront également abordés.

15:45 - 16:15 : Pause

16:15 - 17:45

Session 3 : Axe 3 - Méthodes d'analyse de systèmes non-linéaires & Axe 1 - Exploitation et Modélisation des Non-Linéarités (Chair : C-H. Lamarque)

Modélisation et analyse expérimentale du comportement dynamique d'équipements aérospatiaux attachés via un système d'attaches repositionnables

16:15

Lisa Fournier (ISAE)

Les systèmes d'attaches repositionnables (SAR) sont déjà utilisés dans l'industrie aérospatiale pour attacher certains équipements aux structures en raison de leur flexibilité et facilité d'utilisation. A première vue, ces équipements attachés via ces attaches se comportent comme des résonateurs avec un mode de suspension, mais au cours de cette étude, il a également été observé expérimentalement qu'un phénomène de filtrage se produit lors d'accélération de grande amplitude. Ceci donne une opportunité intéressante de limiter les dommages sur des équipements vulnérables exposés à un environnement aléatoire sévère qui pourrait conduire à leur dégradation. Ce travail vise à développer un modèle dynamique non linéaire prédictif qui représente le comportement de tels systèmes de fixation, afin de pouvoir éviter d'endommager des équipements soumis à des environnements vibroacoustiques sévères. Ces travaux présentent une caractérisation expérimentale et un modèle dynamique analytique non linéaire du système d'attache repositionnable considéré. Ce modèle est comparé à une série d'essais expérimentaux réalisés sur une structure semblable à un équipement fixé avec un SAR de chez 3M Dual Lock, référence SJ3560, sur une large gamme de fréquences et différents niveaux d'excitation par la base.

Réponses vibratoires non linéaires d'un assemblage industriel à une excitation aléatoire, multipoints et corrélée : essais, modélisations et simulations 16:30

Sébastien Talik (CEA Cesta)

En vol, un véhicule aéronautique est exposé à des fluctuations de pression sur sa paroi externe qui génèrent une mise en vibration de la structure. Cette sollicitation dynamique est particulièrement intense dans le cas de la rentrée atmosphérique d'une structure aéronautique. Cette structure peut présenter une réponse vibratoire non linéaire par l'apparition de frottements dans l'assemblage. La simulation de ces vibrations nécessite d'une part une modélisation vibroacoustique des fluctuations de la pression de la paroi et de la pression de l'air à l'intérieur du véhicule. D'autre part, une modélisation non linéaire de cette structure industrielle doit être mise en place ainsi qu'une méthode de simulation des vibrations non linéaires à ces sollicitations identifiées comme des excitations aléatoires multipoints et corrélées. Cette présentation se propose d'exposer le triptyque complet "expériences-modélisations-simulations" relatif à la réponse vibratoire non linéaire d'un assemblage industriel soumis à une excitation aléatoire multipoints et corrélée. Cet assemblage industriel, représentant un véhicule balistique et comprenant des liaisons frottantes, a été développé au CEA CESTA dans le but de progresser expérimentalement et numériquement dans l'étude de vibrations non linéaires avec des structures industrielles réelles et des chargements réels.

Interactions intermodales dans une chaîne d'oscillateurs non linéaires de type masses imbriquées 16:45

Jean Flosi (ENTPE)

A periodic chain of mass-in-mass cells with pure cubic non-linearity is studied. Modal decomposition of the solutions is deduced from the dispersion equation of the associated linear system, and then the system is projected on two of its internally resonant modes. A multiple scale study of the chain is conducted for the free and forced system considering a 1 : 3 internal resonance. Study of fast and slow dynamics reveals two slow invariant manifolds (SIMs), instability zones, singularities and frequency responses curves leading to prediction of periodic and non-periodic responses of the chain. Analytical results are verified numerically and will be accompanied by experimental results.

Nonlinear standing wave formation in damped oscillator chains 17:00

Arthur Barbosa (FEMTO-ST)

This study introduces a approach for obtaining and stabilizing solitonic solutions in macromechanical damped resonators subjected to base acceleration. The primary focus of this investigation centers on the analysis of Intrinsic Localized Modes (ILMs) and solitons in nonlinear systems, particularly within a damped Duffing oscillator chains. To elucidate this phenomenon, the Nonlinear Schrödinger equation (NLSE) is employed, and a technique is presented for identifying and ensuring the stability of solitonic solutions even considering the damping. The approach involves a analysis of each oscillator's linear characteristics to design the coupling and nonlinear stiffness parameters. The results highlight the need for more extensive experimental investigations into the impact of damping in structures subjected to external excitation. In this context, the proposed method serves as a tool for engineers, aiding them in selecting appropriate designs for applications involving energy localization in nonlinear systems. This strategy can be extended to similar systems, irrespective of their specific architectural configuration, making it applicable across a broad spectrum of practical contexts.

Création d'absorbeurs électroacoustiques à divers comportements non linéaires

Maxime Morell (ENTPE)

17:15

En mécanique, les non-linéarités sont de plus en plus utilisées pour l'absorption et l'isolation des vibrations. Dans le domaine acoustique, les avantages des non-linéarités sont peu exploités en raison de la difficulté à les mettre en place ou à les activer pour de faibles niveaux d'excitation sonore. En effet, les comportements acoustiques non linéaires ne sont souvent activés qu'à partir d'un seuil se trouvant à des amplitudes élevées qui endommagent de manière irréversible l'oreille humaine. Par conséquent, les comportements non linéaires acoustiques ne concernent que quelques applications spécifiques. Pour bénéficier des avantages des non-linéarités comme l'augmentation de la gamme fréquentielle d'efficacité, ou d'un pompage énergétique plus rapide en régime transitoire, il faut donc activer les régimes non linéaires à de faibles amplitudes d'excitation. La création d'absorbeurs électroacoustiques linéaires par contrôle d'impédance actif du haut-parleur a été largement étudiée, et la création de résonateurs non-linéaires par la même méthode n'est pas immédiate du fait de la synthèse du contrôle par des approches fréquentielles permettant le pilotage de la dynamique du haut-parleur. Notre travail a donc pour objectif de créer un résonateur non linéaire fonctionnel à faible amplitudes d'excitation à l'aide d'un nouvel algorithme basé sur une approche temporelle du contrôle et non fréquentielle. Cette méthode permet d'implémenter divers types de comportements non linéaires, polynomiaux ou non. Dans ce cadre, plusieurs comportements non linéaires sont synthétisés expérimentalement pour le contrôle d'un mode acoustique de tube. Ils seront présentés et comparés au modèle analytique réduit établi.

Réduction vibratoire large bande par combinaison de l'effet Trou Noir Acoustique et de non-linéarités de contact

Adrien Pelat (Université du Mans)

17:30

L'effet Trou Noir Acoustique (TNA) permet d'élaborer des techniques passives de réduction des vibrations sans ajout de masse. Sa mise en oeuvre habituelle dans une structure mince consiste à réaliser un gradient local d'épaisseur selon un profil parabolique, revêtu d'un film dissipatif. Cette inhomogénéité entraîne un piégeage et un amortissement particulièrement efficaces des vibrations de flexion. Il existe une grande variété de dispositifs à TNA qui induisent des performances attractives de réduction vibratoire au-dessus d'une fréquence seuil d'efficacité dépendante de la taille relative du TNA à la longueur d'onde. Pour améliorer les performances aux basses fréquences, il est proposé dans ce travail de combiner l'effet TNA avec des Vibro-Impacteurs (VI) de sorte à introduire des non-linéarités de contact capables de transférer l'énergie vibratoire des basses vers les hautes fréquences. Le dispositif résultant TNA-VI pouvant alors réduire les niveaux vibratoires en large bande, en incluant les basses fréquences. Cet exposé synthétise la progression de la maturité technique du principe des TNA-VI, à partir de mises en évidence expérimentales et numériques dans le cas d'un système de laboratoire à caractère académique jusqu'à la conception d'un absorbeur de chocs vibratoires appliqué au contexte spatial. Les points clés de la conception et les performances sont étudiés au moyen de simulations numériques combinant un modèle d'éléments finis spatiaux et un schéma d'intégration temporelle conservatif. Un démonstrateur est également étudié expérimentalement dans les régimes linéaire et non linéaire (sans et avec vibro-impacteurs, respectivement). L'analyse des performances, réalisée à partir des réponses vibratoires aux bruits à large bande et aux chocs, montre des résultats prometteurs pour d'éventuelles applications ultérieures.

10 novembre 2023 — Matin

9:00 - 9:15 : Accueil Café

9:15 - 10:00 : Conférence plénière, M. Defoort (TIMA) - Chaos in micro-mechanics: towards MEMS-based secured communications

10:00 - 11:00

Session 4 : Axe 1 - Exploitation et Modélisation des Non-Linéarités (Chair : M. Defoort)

Un absorbeur NES piézoélectrique composé d'une source tension non linéaire : théorie et expériences 10:00

Kevin Dekemele (Université de Gent)

Le nonlinear energy sink (NES) est un absorbeur dynamique qui, grâce à ses éléments non linéaires, a la capacité de résonner à une bande de fréquence plus large par rapport à les absorbeurs dynamique linéaire. Le NES a été étudié pour la première fois au début des années 2000, comme un amortisseur mécanique composé d'une masse, d'un amortissement linéaire et d'une raideur non linéaire. Dans la littérature, la raideur d'un NES a souvent été choisi purement cubique. Autrement que de manière mécanique, une autre technique pour amortir les vibrations est les absorbeurs shunt piézoélectriques. Dans ce cas, un élément piézoélectrique est associé à une structure principale pour coupler ses vibrations à un circuit électronique bien choisi, analogue d'un NES mécanique, dont le rôle sera de dissiper ou contrecarrer les vibrations mécaniques. Cette présentation montrera que les caractéristiques attrayantes d'un NES mécanique sont aussi réalisables avec un shunt piézoélectrique non linéaire. Le circuit shunt est composé d'une inductance synthétique linéaire et d'un circuit non linéaire (réalisé avec des multiplicateurs analogiques) équivalent à une source tension proportionnelle au cube de la tension aux bornes des électrodes de l'élément piézoélectrique. Le comportement dynamique théorique du système principal et le circuit shunt sont étudiés par la méthode de balance harmonique. Ce comportement est vérifié expérimentalement sur une poutre encastrée-libre et un circuit shunt consistant en deux multiplicateurs et quatre amplificateurs opérationnels.

Prise en compte de l'amortissement non linéaire dans le dimensionnement d'un NES 10:15

Etienne Gourc (LMA)

Cette présentation traite du contrôle passif d'un système résonant à l'aide d'un absorbeur non linéaire de type NES. Un NES est un oscillateur de faible masse par rapport au système à contrôler, couplé à celui-ci par le biais d'une raideur essentiellement non linéaire. Dans les années 2000, il a été montré que l'absence de raideur linéaire permet au NES d'entrer en capture de résonance 1 :1 en faisant un dispositif intrinsèquement large bande. Cette caractéristique remarquable est cependant nuancée par deux effets parasites : (i) la présence d'un seuil d'activation, (ii) l'apparition d'une résonance détachée qui limite la plage d'utilisation des NES. L'objectif de cette étude est de montrer que la prise en compte d'un amortissement visqueux non linéaire (géométrique) permet de repousser significativement l'apparition de la résonance détachée. Pour ce faire, le comportement d'un système à un degrés de liberté couplé à un NES à raideur cubique et amortissement non linéaire est étudié à l'aide de la méthode mixte échelles multiples / balance harmonique. Les équations du flux lent obtenues sont utilisées pour développer une méthode de dimensionnement, confirmant les bénéfices apportés par l'ajout d'un amortissement non linéaire.

Conception théorique, simulation numérique et mise en œuvre expérimentale d'un NES pneumatique

10:30

Clément Raimond (ISAE)

Les systèmes aérospatiaux sont souvent exposés à des conditions thermiques et de vibration sévères qui peuvent réduire leur durée de vie. Pour atténuer le niveau élevé de contrainte sur les structures et prolonger leur longévité, il est nécessaire de disposer de systèmes de protection contre les vibrations dotés d'un amortissement approprié. Une solution prometteuse est celle d'un absorbeur non linéaire de vibrations (Nonlinear Energy Sink ou NES), un dispositif faiblement dissipatif avec une masse relativement réduite, couplé de manière élastique et non linéaire à une structure. Cependant, un problème critique dans l'utilisation d'un NES est la nécessité d'un réglage précis de l'amortissement afin d'éviter les résonances détachées qui réduisent grandement leurs performances.

Cette étude introduit un NES pneumatique qui permet d'ajuster l'amortissement au moyen de perte de charge aérodynamique. Le dispositif se compose d'une membrane métallique circulaire qui sépare deux chambres à air, reliées par un orifice. Les vibrations de cette membrane circulaire induisent des écoulements à haute vitesse à travers l'orifice, générant un amortissement non linéaire maîtrisé. L'étude présente la conception théorique, la mise en œuvre expérimentale et les simulations numériques du NES pneumatique.

Étude numérique et expérimentale d'un NES vibroacoustique bistable

10:45

Pierre Olivier-Mattei (LMA)

Il a été établi dans des travaux précédents qu'une membrane élastique peut être couplée à un système acoustique et agir comme un NES. Nous examinerons l'efficacité de l'absorption de membranes monostables et bistables en utilisant une approche d'optimisation numérique. Cette approche repose sur l'analyse de la courbe de crête de la réponse en fréquence du système primaire en fonction du paramètre d'optimisation. Le paramètre retenu ici est la raideur linéaire de la membrane qui permet, lorsque sa valeur est rendue négative, d'obtenir simplement la bistabilité du NES. Nous montrons que, sous certaines conditions, la bistabilité de la membrane permet d'améliorer son efficacité. Nous présentons des résultats d'intégration et d'optimisation numérique ainsi que des premiers résultats expérimentaux.

11:00 - 11:30 : Pause

Session 5: Axe 1 - Exploitation et Modélisation des Non-Linéarités (Chair : E. Sadoulet-Reboul)

Un absorbeur de vibration hybride avec pilotage des non-linéarités

11:30

Louis Mesny (INSA Lyon)

Ces dernières années, de nombreux travaux ont cherché à tirer profit des non-linéarités en les fonctionnalisant. L'objectif de ces travaux est de les piloter grâce au contrôle actif. Les intérêts sont multiples : prendre en compte les variations importantes d'un système ou de son environnement au cours du temps, ou obtenir des propriétés structurelles particulières. L'étude se focalisera sur les absorbeurs de vibrations. L'ajout d'une non-linéarité dans un absorbeur de vibration permet une meilleure robustesse en fréquence et en amplitude. Cependant, les non-linéarités apportent plusieurs phénomènes indésirables tels que les bifurcations, les solutions isolées et font apparaître un seuil d'activation/désactivation de l'absorbeur. Les absorbeurs de vibrations hybrides, quant à eux, combinent le contrôle passif et actif et utilisent des capteurs et des actionneurs afin d'augmenter les performances et la réactivité du système. L'hybridation offre un aspect sécurisant ou "fail-safe", puisque l'absorbeur passif continue de fonctionner si la partie active s'arrête, mais souffre de problèmes d'encombrement dus au débattement de l'absorbeur et de consommation énergétique importante. Afin de tirer avantage et dépasser les limitations de chacune des deux approches, elles sont combinées pour créer un absorbeur hybride non linéaire. Le contrôle actif est utilisé pour rendre l'absorbeur adaptatif et permettre de modifier son amortissement et/ou sa non-linéarité pour changer la position de son seuil d'activation, réduire le débattement de l'absorbeur ou encore contrôler les points de bifurcations. Toutes les prédictions numériques sont validées avec une preuve de concept expérimentale.

Mise en oeuvre et analyse d'un absorbeur vibro-acoustique non linéaire par continuations expérimentale et numérique

11:45

Arthur Givois (UTC)

En vue de la conception d'absorbeurs vibro-acoustiques passifs, un banc électro-mécano-acoustique est fabriqué. Le dispositif réalisé en bois permet d'installer, de tendre et solliciter une membrane circulaire mince dans un régime de grands déplacements. Le dispositif donne la possibilité d'étudier les vibrations de la membrane en présence ou absence d'un résonateur acoustique de fréquence légèrement supérieure à celle de la membrane à faibles niveaux de déplacement, rendant possible l'observation du pompage énergétique en acoustique étudié au LMA au cours des deux dernières décennies. L'intérêt est d'analyser soit le comportement non linéaire de la membrane isolée, soit le couplage vibro-acoustique résultant de cette non-linéarité. Une démarche de continuation est mise en oeuvre, d'abord pour mesurer la courbe maîtresse de la membrane seule au moyen d'un contrôle de phase, tandis que le système vibro-acoustique est analysé à fréquence fixe avec une continuation en amplitude. Un modèle de membrane simplifié à un mode est simulé par continuation de solutions périodiques : la comparaison explique les phénomènes observés sur le banc vibro-acoustique, notamment une réduction du niveau acoustique à la suite d'un saut clairement identifié, et permet un recalage de paramètres

Atténuation passive de vibrations auto-entretenues au moyen d'un absorbeur dynamique non linéaire bistable

12:00

Baptiste Bergeot (INSA CVL)

En mécanique ou en acoustique, le contrôle de vibrations est un champ de recherche très actif. Actuellement, trois grands types de technologie sont majoritairement utilisées dans l'industrie : le contrôle passif par dissipation, le contrôle passif à l'aide d'absorbeurs dynamiques et le contrôle actif ; chacune de ses techniques possédant ses avantages et ses inconvénients. Parmi les dispositifs passifs, les absorbeurs dynamiques non linéaires de type NES (Nonlinear Energy Sink) ont montré leur efficacité comme solution alternative aux moyens de contrôle passifs linéaires de type TMD (Tuned Mass Damper) ; et ce pour atténuer des vibrations libres, auto-entretenues et des résonances vibratoires. Les NES, contrairement aux TMD, possèdent la capacité d'absorber l'énergie vibratoire à n'importe quelle fréquence et peut donc être qualifié d'amortisseur passif large bande. Pour se déclencher, les NES doivent cependant atteindre un seuil en énergie, ce qui les rend en général peu efficace pour atténuer des vibrations de faibles amplitudes. Dans le cadre de l'atténuation de vibrations libres et de résonance vibratoire, les NES bistables (BNES) ont montré qu'ils pouvaient se déclencher à des seuils énergétiques plus faibles que les NES classiques. Ce travail de recherche étudie la capacité d'un BNES à atténuer des vibrations auto-entretenues (pour cela un oscillateur de Van der Pol est utilisé comme archétype d'oscillateur auto-entretenu). Dans un premier temps, il est montré au travers de simulations numériques que dans ce cadre le BNES peut être beaucoup plus efficace qu'un NES classique. Cependant, les régimes optimaux observés sont (i) très sensibles aux variations des paramètres et (ii) possèdent des bassins d'attraction (ensembles des conditions initiales menant au régime) de petites tailles. Dans un deuxième temps, une analyse asymptotique originale, prenant en compte les spécificités du BNES, permet de comprendre les mécanismes sous-jacents aux comportements dynamiques observés sur les simulations numériques du modèle.

Absorbeurs non linéaires pour le contrôle passif des instabilités aéroélastiques des drones à ailes très flexibles

12:15

Roberto Alcorta (INSA Lyon)

Le drone de type HALE (Haute Altitude, Longue Endurance) est un vecteur aérien innovant dont le but est de survoler une zone géographique déterminée pendant une longue durée, d'où son surnom de "pseudo satellites". Malgré son énorme potentiel dans des domaines tels que les télécommunications, la météorologie et la surveillance, ce concept se développe lentement en raison des importants verrous scientifiques qui lui sont propres. En effet, le respect de son cahier des charges impose une conception avec des ailes souples à très grande envergure, ce qui entraîne une flexibilité importante. En conséquence, les fréquences propres du drone sont basses et celui-ci devient particulièrement susceptible aux instabilités dynamiques par couplage aéroélastique. Cet aspect s'avère critique lorsque le drone sort de ses conditions nominales de vol, et a déjà entraîné la perte de plusieurs prototypes (ex. NASA Hélios). Or, la modélisation et la prédiction de ces instabilités - ainsi que les régimes dynamiques résultants - sont loin d'être triviales, dû au comportement non linéaire de la structure et à son interaction avec les chargements aérodynamiques. On présentera dans cette contribution les avancements récents à l'Ecole de l'Air et de l'Espace pour s'attaquer à cette problématique. Dans une première partie, les détails du modèle - à savoir : description des ailes par modélisation de type poutre non linéaire (à flèches et rotations modérées), fuselage rigide en vol longitudinal, approximation quasi-statique par tranches des efforts aérodynamiques - et son implémentation numérique seront abordés. Seront ensuite présentés les premiers résultats concernant le contrôle vibratoire des régimes instables par absorbeurs non linéaires. En effet, ce dernier point est nécessaire pour pallier les limitations des absorbeurs conventionnels (du type amortisseur à masse accordée) face à des fréquences propres inconnues/incertaines/variables. Une originalité de ces travaux est le contrôle passif du flottement dit "de corps rigide" issu de la prise en compte de la dynamique de vol : celui-ci est habituellement traité par contrôle et commande actifs pour des aéronefs moins flexibles. Ce projet étant toujours en cours, une dernière partie est dédiée aux perspectives, parmi lesquelles on compte : l'extension à des modèles d'aérodynamique non linéaire, l'utilisation de matériaux anisotropes, des essais expérimentaux en soufflerie sous grands déplacements et la mise en place d'une preuve de concept expérimentale du contrôle passif non linéaire sur une aile très flexible.

12:15 - 14:00 : Repas

10 novembre 2023 — Après-Midi

14:00 - 15:00

Session 6 : Axe 1 - Exploitation et Modélisation des Non-Linéarités & Axe 3 - Méthodes d'analyse de systèmes non-linéaires (Chair : O. Thomas)

Poutres et rubans soumis à des couples purs

Loïc Le Marrec (Université de Rennes)

14:00

Cet exposé portera sur une modélisation analytique et explicite de la déformation non linéaire d'une poutre sous un chargement limité à un couple exercé aux extrémités de la structures. On montrera comment ce comportement général induit deux classes de comportement, l'un associé à une poutre épaisse et un autre régime dont une limite asymptotique est celui d'un ruban. Une dérivation purement analytique permettra d'exhiber les solutions générales décrivant la configuration d'équilibre et quelques cas de bifurcations.

New physical insights in passive dynamical stabilization

Alvaro Anzoleaga Grandi (ENSAM)

14:15

Dynamical stabilization enables to shape the effective potential energy landscape of a physical system by rapidly varying its geometrical or mechanical properties in time. This technique is widely used in physics because it can cause particles or systems to move to new stable equilibrium configurational states that would otherwise not exist when no periodic modulations are applied. The simplest model to rationalize this dynamical phenomenon is the one of a 1 degree-of-freedom (d.o.f.) Periodically Oscillating-Diverging System (P.O.D.S.): a mass in a potential energy landscape whose local curvature is periodically modulated between a negative (diverging mass) and a positive value (oscillating mass). It turns out the current dynamical stabilization theory focuses on one asymptotic limit of the first stability tongue of the stability diagram of the P.O.D.S., but the rest of the stability diagram has been overlooked. In this presentation, we numerically and experimentally study the physics of a 1 d.o.f. P.O.D.S. model with a square wave modulation function (in this case, the stability diagram is analytically defined) and we focus on the mechanics at the tip of the stability tongues that we believe is a fundamental problem in physics.

Bassins d'attraction dynamiques dans un modèle simple d'instrument de musique auto-oscillant

Soizic Terrien (Université du Mans)

14:30

Les instruments de musique auto-oscillants sont des systèmes dynamiques non linéaires capables de produire une grande diversité de régimes sonores, qui dépendent de nombreux paramètres de conception et de contrôle. Une caractéristique typique de ces systèmes est l'existence, dans l'espace des paramètres, de régions dans lesquelles plusieurs régimes stables coexistent. Du point de vue musical, contrôler quel régime est obtenu en pratique est alors complexe. Un modèle simple d'instrument de musique à anche est considéré, et les plages de paramètres pour lesquelles le système est multistable sont identifiées grâce à une analyse de bifurcation. Dans ces zones multistables, les bassins d'attraction correspondent à l'ensemble des conditions initiales menant à un régime donné. En pratique, ils caractérisent la facilité d'accès aux différents régimes. Les frontières entre les bassins d'attraction sont ici explorées numériquement en simulation temporelle et théoriquement par l'étude de variétés invariantes. On s'intéresse particulièrement à l'influence de variations temporelles du principal paramètre de contrôle, la pression dans la bouche du musicien, sur ces bassins. Des différences significatives entre les bassins d'attraction dans le cas dynamique et les bassins statiques (quand aucune dynamique de la pression dans la bouche n'est prise en compte) sont mises en évidence. Ces résultats suggèrent que les transitoires d'attaques, qui correspondent à des variations rapides de la pression dans la bouche du musicien, lui permettent de naviguer entre les bassins d'attraction, et ainsi de jouer le régime sonore souhaité parmi les différents régimes possibles.

Approche Hybride Intégrant Données et Physique pour la Prédiction des Bifurcations dans les Systèmes Dynamiques

14:45

Jesus Garcia Perez (University of Michigan)

L'analyse de stabilité non linéaire joue un rôle essentiel dans la conception et l'évaluation des systèmes dynamiques. Les méthodes d'analyse basées sur des modèles numériques requièrent des ressources considérables en matière de calcul. Cependant, elles sont limitées par la disponibilité des données et ne parviennent pas toujours à généraliser correctement. L'intégration d'informations physiques du système dans les méthodes basées sur les données peut étendre leur applicabilité et améliorer leur précision. Dans cette étude, nous présentons une approche de prédiction pour les diagrammes de bifurcation dans les systèmes non linéaires sujets aux instabilités en utilisant des mesures du système avant que les instabilités ne se manifestent. Cette méthode est une approche hybride qui combine une analyse asymptotique fournie par la méthode des échelles multiples avec une technique de prédiction. Plus précisément, notre approche exploite les non-linéarités inhérentes au système pour obtenir une forme normale grâce à la méthode des échelles multiples. Ensuite, les coefficients de cette forme normale sont estimés à partir de données provenant des transitoires du régime pré-bifurcation. Nous démontrons l'applicabilité de notre méthode en identifiant la dynamique post-bifurcation dans plusieurs classes de systèmes non linéaires. Ces travaux ouvrent la voie à des applications potentielles dans la prédiction et le contrôle des instabilités dans divers domaines de l'ingénierie et des sciences.