



INSIS



Meca
Wave

<http://mecawave.cnrs.fr/>

3ème colloque du GdR MecaWave

8-12 mai 2023

Centre IGESA, 83400 Porquerolles

Introduction

Le GdR MecaWave, créé le 1er janvier 2018 et qui se terminera fin décembre 2023, fédère des recherches sur les ondes dans les solides, du point de vue de l’acoustique physique, de la mécanique théorique et des mathématiques appliquées. Porté par la section 9 du CNRS, il structure des activités communes à ces disciplines à l’échelle française.

Ce troisième et dernier colloque sera l’occasion d’échanges sur les 4 thèmes du GDR :

1. Homogénéisation dynamique ;
2. Ondes non linéaires ;
3. Propagation guidée ;
4. Problèmes inverses.

Les présentations se répartiront entre communications orales et posters, en fonction du nombre de participants. Ce colloque sera aussi l’occasion de mettre en place un vocabulaire commun entre les participants, venant d’horizons thématiques variés. Pour cela, chaque matinée commencera par un cours sur les thèmes suivants :

- Guillaume Anciaux (EPFL, Suisse) : “Fragmentation : from theory to numerical applications using FEM approaches”
- Romain Fleury (EPFL, Suisse) : “Scattering of guided waves”

Comité d’Organisation : Bruno Lombard, Kim Pham, Fabien Treyssède.

Comité Scientifique : Vahan Baronian, Cédric Bellis, Nicolas Favrie, Simon Félix, Agnès Maurel, Jean-François Mercier, Anissa Meziane, Vincent Pagneux, Samuel Rodriguez, Eric Savin.

Programme

	Mardi 9	Mercredi 10	Jeudi 11	Vendredi 12
9h : cours	G. Anciaux (1)	G. Anciaux (2)	Fleury (2)	
10h30 : café				
11h	J. F. Mercier	C. Boutin	G. Rosi	
11h30	E. Savin	N. Lebbe	R. Cornaggia	
12h : repas				
14h	R. Fleury (1)	S. El Ouafa	F. Lemoult	
14h30	R. Fleury (1)	F. Treyssede	J.B. Kouchoro	
15h : libre + café				
17h30	S. Tachet	A. Dalmora	A. Imperiale	
18h	B. Lombard / N.F.	B. Lombard / S.G.	H. Boué	
18h30	A.Delory	V. Vasanthan	E. Duval	

Résumés

Homogénéisation de surfaces microstructurées pour l'acoustique en présence d'un écoulement potentiel 2D de faible Mach

Jean-François Mercier¹

POEMS, CNRS, Inria, ENSTA Paris, Institut Polytechnique de Paris, 91120 Palaiseau, France ¹

09/05/2023
11h00
T1

On présente une méthode d'homogénéisation de surface pour étudier la réflexion acoustique par des surfaces minces microstructurées en présence d'un fluide en écoulement. Pour des surfaces rigides, on considère un écoulement potentiel 2D suffisamment lent pour qu'une approximation faible Mach puisse être introduite. En régime harmonique nous considérons des ondes acoustiques dont la longueur d'onde typique $1/k$ est beaucoup plus grande que l'espacement h et l'épaisseur e des microstructures. En introduisant le petit paramètre $\varepsilon = kh$, on applique une combinaison de développements multi-échelles et de développements asymptotiques raccordés à l'approximation faible Mach de l'équation de Helmholtz convectée. On obtient une condition aux limites sur une paroi plane équivalente, qui relie la vitesse acoustique à ses dérivées normale et tangentielle. La précision du modèle effectif est testée numériquement pour différentes formes de structures et on valide la précision du modèle en $O(\varepsilon^2)$.

Localisation de sources acoustiques dans des écoulements hétérogènes

Éric Savin¹, Jean-Luc Akian², Luc Bonnet³, Josselin Garnier⁴, Étienne Gay³,
Christophe Peyret³

09/05/2023
11h30
T4

¹ Computer Science Dept., ONERA

² Materials and Structures Dept., ONERA

³ Computational Fluid Dynamics Dept., ONERA

⁴ CMAP, École Polytechnique

On s'intéresse dans ce travail à des techniques d'imagerie par interférométrie cohérente (Coherent INTerferometry, CINT, Borcea *et al.* 2005) pour la localisation de cibles utilisant des ondes acoustiques, dans des applications en aérodynamique, hydrodynamique et/ou aéroacoustique. On considère en particulier une extension de cette approche à des milieux hétérogènes en mouvement tels que des écoulements ou des jets, que l'on illustre par des exemples numériques (Gay *et al.* 2021).

L'objectif de l'imagerie est d'estimer la position de sources ou de réflecteurs grâce à des récepteurs passifs ou actifs (émettant des ondes), respectivement. L'algorithme CINT est fondé sur la rétro-propagation numérique de corrélations empiriques localisées en temps et en espace des signaux enregistrés par un réseau de transducteurs. Il permet de reconstruire des images statistiquement stables quand le milieu sondé est aléatoirement hétérogène et diffuse les ondes propagées. Ces perturbations sont, dans les techniques classiques telles que la migration de Kirchhoff, considérées comme une nuisance dont il faut réduire l'influence dans le traitement des enregistrements. Des expériences récentes en sismologie, entre autres, ont montré au contraire que la diffusion pouvait être utilisée efficacement à des fins d'identification et de localisation via des corrélations empiriques des signaux sismiques. Ces propriétés s'étendent à tous les types d'onde, notamment le cas acoustique scalaire envisagé dans cette recherche.

Three-scale asymptotic homogenization of an acoustic metasurface made of 3D Helmholtz resonators

09/05/2023
17h30
T1

Sarah TACHET¹, Kim PHAM¹, Agnes MAUREL²

¹ IMSIA, ENSTA Paris, 828 Bd des Marchaux, 91732 Palaiseau, France

² Institut Langevin, ESPCI ParisTech, 1 rue Jussieu, Paris 75005, France

We study a reflective metasurface made of 3D subwavelength Helmholtz resonators. We provide an effective model in the time domain obtained by using a three-scale asymptotic approach.

The metasurface is reduced to an homogenized boundary condition involving a resonant, frequency dependant impedance.

Our model takes into account boundary layer effects near the neck opening, and we provide a precise method to calculate the « added length ». The results are discussed in both time and frequency domain with comparison with direct numerical simulations.

A hyperbolic generalized Zener model for nonlinear viscoelastic waves

09/05/2023
18h00
T2

Nicolas Favrie¹, Bruno Lombard²

¹ IUSTI, Aix Marseille Univ, CNRS, Polytech, Marseille, France

² LMA, Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, Marseille, France

A macroscopic model describing nonlinear viscoelastic waves is derived in Eulerian formulation, through the introduction of relaxation tensors. It accounts for both constitutive and geometrical nonlinearities. In the case of small deformations, the governing equations recover those of the linear generalized Zener model (GZM) with memory variables, which is widely used in acoustics and seismology. The structure of the relaxation terms implies that the model is dissipative. The chosen family of specific internal energies ensures also that the model is unconditionally hyperbolic. A

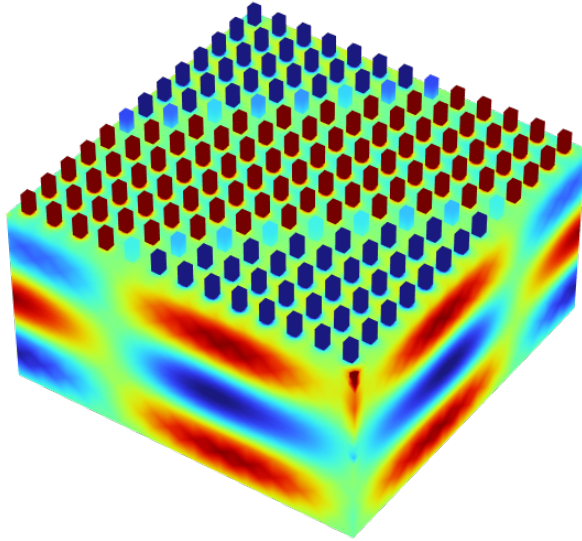


FIGURE 1 – pressure field for a near-resonance wavelength

Godunov-type scheme with relaxation is implemented. A procedure for maintaining isochoric transformations at the discrete level is introduced.

Numerical examples are proposed to illustrate the properties of viscoelastic waves and nonlinear wave phenomena. Figure 2 represents the longitudinal and tangential velocities of a shear Riemann problem in hyperelasticity. In linear regime, the horizontal velocity u would remain identically zero. On the contrary, one observes here that longitudinal waves are generated, which is the signature of a nonlinear coupling.

Reference

N. FAVRIE, B. LOMBARD, *A hyperbolic generalized Zener model for nonlinear viscoelastic waves*, Wave Motion 116 (2023) 103086.

Elastography in deformed viscoelastic strips

Alexandre DELORY^{1,2}, Daniel KIEFER¹, Maxime LANOY^{1,3}, Antonin EDDI²,
Claire PRADA¹, Fabrice LEMOULT¹

¹ Institut Langevin, ESPCI Paris, Université PSL, CNRS, 75005 Paris, France

² Laboratoire Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes, CNRS, ESPCI Paris, Université PSL, Sorbonne Université, Université de Paris, 75005 Paris, France

³ Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans (LAUM), UMR 6613, Institut d'Acoustique - Graduate School (IA-GS), CNRS, Le Mans Université, 72085 Le Mans, France.

09/05/2023
18h30
T3-T4

In ultrasound imaging the human body is usually considered as fluid-like. Actually,

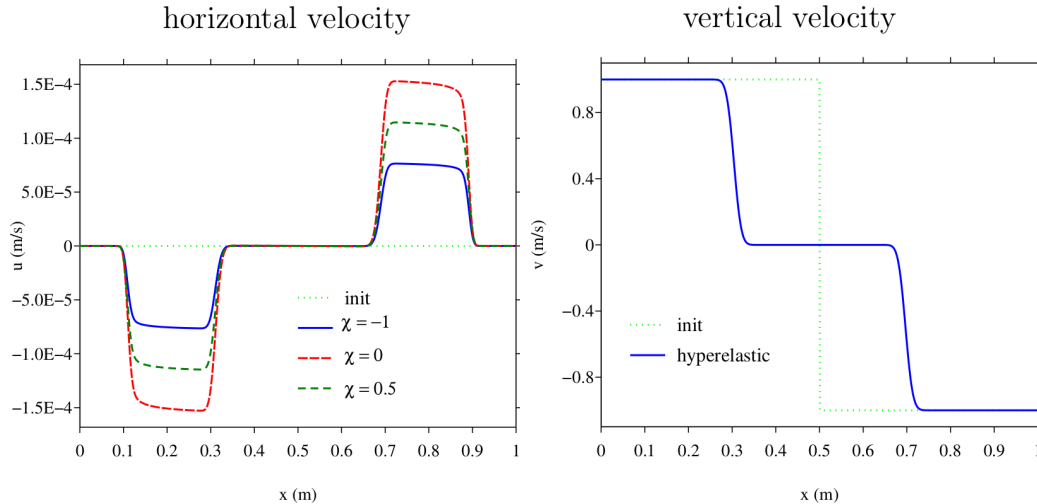


FIGURE 2 – Shear Riemann problem in hyperelasticity. Initially a discontinuous tangential velocity is imposed (dashed line). Various values of the nonlinear parameter χ are considered.

since human tissues can support shear elastic waves a more accurate description is a nearly incompressible soft material. For the last 20 years, the shear wave elastography has exploited the shear waves' velocity to provide information on the tissues stiffness. Nevertheless, the apparent velocity is not always a direct measure of the stiffness. We have built a model experiment on a strip made of Ecoflex, to highlight two main difficulties of the quantitiveness of elastography : (i) the measured velocity is modified by the geometry due to waveguiding and, (ii) the velocity is modified when the strip is prestressed. These two observations must be considered to retrieve the tissue bulk material properties. To improve the modelling of these observations, we have conducted more systematic measurements of the guided waves in the same strip with elongations reaching 80% and with different boundary conditions. Thanks to an acousto-elasticity formulation of the problem, the experimental dispersion curves are well-predicted. Additionally, we performed elastography experiments on the same strip and we are also able to predict the velocities at stake. We believe these results should help improve the reliability of quantitative elastography.

Onde acoustique avec changement de phase induit

10/05/2023
11h00
T1

Claude Boutin¹, Rodolfo Venegas²

¹ Univ. Lyon, Entpe, UMR CNRS 5513, Vaulx-en-Velin

² Universidad Austral, Instituto de Acoustica, Valdivia, Chile

Cet article traite du couplage entre la propagation d'ondes acoustiques et le phénomène d'évaporation-condensation. On considère un milieu poreux rigide saturé d'un gaz mélange d'air sec et de vapeur d'eau. A l'équilibre, les parois du solide sont couvertes d'une fine couche d'eau et la vapeur d'eau est à sa pression de saturation. Sous l'effet d'une perturbation de pression, l'eau se vaporise ou se condense, ce phénomène venant perturber les caractéristiques usuelles des ondes acoustiques.

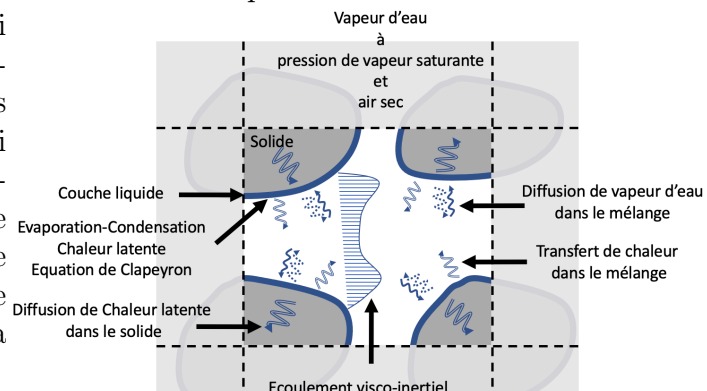
Cette situation est décrite à l'aide de la méthode d'homogénéisation des milieux périodiques. L'hypothèse de petites perturbations et la réversibilité du changement de phase permet d'aborder le problème dans un cadre linéaire. La physique locale usuelle (équation de Navier-Stokes linéarisée pour le gaz, conservation de la masse, transfert de chaleur avec solide isotherme, équation d'état), doit ici être revue et complétée par (cf. Figure) :

- l'équation de Clapeyron (EC) qui relie la température de la paroi liquide à la pression de la vapeur d'eau et à la chaleur latente de changement d'état,
- le transfert de la chaleur latente de changement d'état dans le solide,
- l'équation de diffusion de la vapeur d'eau dans le gaz,
- la loi d'état de la vapeur.

Sous l'hypothèse de grandes longueurs d'ondes, les pressions de gaz et de vapeur sont constantes à l'échelle des pores et le processus d'homogénéisation en régime harmonique conduit successivement :

- à une loi de Darcy visco-inertielle usuelle (avec les paramètres du gaz),
- aux flux de masse et de chaleur associés au changement de phase, obtenus par résolution des problèmes couplés de transfert de chaleur et de diffusion de vapeur, avec les conditions aux limites spécifiques à l'interface gaz/liquide : température uniforme de paroi fixée par EC et discontinuités des flux.
- et enfin à la compressibilité effective du gaz est obtenue en exprimant la conservation globale de la masse air sec et d'eau dans les pores.

Sur la base du modèle ainsi obtenu on discute le rôle des paramètres adimensionnels et des fréquences caractéristiques qui déterminent la nature et l'amplitude des perturbations de vitesse et d'amortissement de l'onde acoustique en fonction de la constitution du gaz et de sa température.



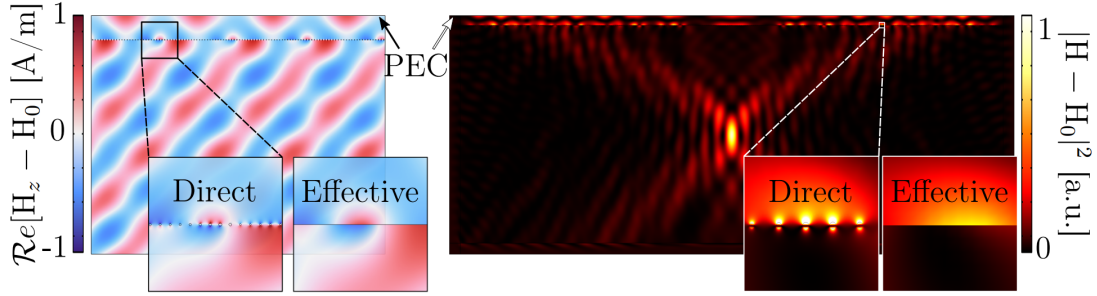


FIGURE 3 – Optimization of two plasmonic metasurfaces in reflection made of circular meta-atoms ($\varepsilon = -1.05 - 0.001i$) and zooms showing the adequation between direct and effective simulations; (left) meta-deflector (normal incident wave is reflected in the 4th order of diffraction) (right) meta-lens (the normal incident wave is reflected and focalized).

10/05/2023
11h30
T1-T4

Optimization of resonant and quasi-periodic metasurfaces

Nicolas Lebbe¹, Kim Pham², Agnès Maurel³

¹ LAPLACE, CNRS, INPT, UPS, Université de Toulouse, France

² IMSIA, CNRS, EDF, CEA, ENSTA Paris, Institut Polytechnique de Paris, France

³ Institut Langevin, ESPCI Paris, Université PSL, Sorbonne Université, CNRS, France

In the last decades, models reducing the geometric complexity of metasurfaces into planar interfaces with effective transition conditions have been developed in the fields of acoustics, water waves, electromagnetism, etc. In electromagnetism, these transition conditions replace the continuity of $[[\mathbf{E}]] \times \mathbf{n}$ and $[[\mathbf{H}]] \times \mathbf{n}$ (where $[[\cdot]]$ denotes the jump between two mediums and \mathbf{n} the normal vector) with [1]

$$[[\mathbf{E}]] \times \mathbf{n} = i\omega\mu_0\mathbf{M}_{\parallel} - \nabla_{\parallel} \times \mathbf{P}_{\perp} \quad \text{and} \quad [[\mathbf{H}]] \times \mathbf{n} = -i\omega\varepsilon_0\mathbf{P}_{\parallel} - \nabla_{\parallel} \times \mathbf{M}_{\perp}, \quad (1)$$

where \mathbf{P} and \mathbf{M} are adequate surface magnetization and polarization which involve effective surface parameters obtained through an homogenization procedure.

In order to obtain significant effects from the metasurface on the incident waves, it is necessary to use resonant elements (Mie or plasmonic resonances [2], Helmholtz resonators etc.) which are distributed non-periodically. Traditionally, the design of most metasurfaces is obtained by placing elements (a.k.a “meta-atoms”) inducing a given phase shift calculated using a locally periodic approximation. Greater accuracy can be achieved using the homogenization theory and eq. (1) through FEM simulations of the whole metasurface. In this presentation, we will show that exploiting these fast simulations for Transverse Magnetic waves (solutions to Helmholtz equations) with plasmonic resonances, the optimal distribution of the meta-atoms geometries can be found by computing the gradient of given objective functions through adjoint calculations.

References

- [1] N. Lebbe, K. Pham and A. Maurel *Stable GSTC formulation for Maxwell's equations*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022.
- [2] N. Lebbe, A. Maurel and K. Pham *Homogenized transition conditions for plasmonic metasurfaces*, Physical Review B, 2023.

Ondes de Bloch élastiques bidimensionnelles dans des structures périodiques hélicoïdales

Fabien Treyssède¹, Changwei Zhou¹

¹ Université Gustave Eiffel, GERS-GeoEND, Campus de Nantes, Allée des ponts et chaussées, CS 5004, 44344 Bouguenais Cedex, France

10/05/2023
14h30
T3-T1

Notre objectif est d'étudier la propagation d'ondes de Bloch élastiques bidimensionnelles dans des structures périodiques particulières, obéissant à deux symétries hélicoïdales discrètes autour d'un même axe. Pour cela, nous construisons un système de coordonnées tridimensionnel à partir des deux directions hélicoïdales de périodicité du problème. La troisième coordonnée correspond à la direction radiale associée à l'axe de symétrie. À première vue, le système de coordonnées ainsi établi, non trivial, soulève plusieurs interrogations. Peut-on y appliquer le théorème de Bloch ? Comment définir la cellule unitaire ? Comment l'appliquer à des champs élastiques ? Nous montrons que l'existence d'ondes de Bloch dans les structures bi-hélicoïdales peut être justifiée par l'indépendance du tenseur métrique du système de coordonnées par rapport aux deux coordonnées hélicoïdales. Considérant les équations d'équilibre élastodynamique, le théorème de Bloch doit alors être exprimé dans des bases appropriées pour projeter les champs d'ondes (vectoriels), à savoir les bases covariantes/contravariantes du système de coordonnées curviligne. Quant à la cellule unitaire (tridimensionnelle), elle doit être délimitée par des frontières non planes, qui doivent être soigneusement paramétrées. Par ailleurs, les constantes de propagation bidimensionnelles ne sont pas indépendantes l'une de l'autre en raison de la nature cylindrique du problème. Nous montrons comment établir la relation entre ces deux constantes. Finalement, la méthode des éléments finis est mise en oeuvre pour résoudre numériquement le problème. Le calcul des propriétés des modes d'ondes (nombres d'ondes, vitesses de groupe et d'énergie) est effectué le long des directions de propagation hélicoïdales, ainsi que dans les directions axiales et circonférentielles droites. Des validations numériques sont tout d'abord effectuées sur des tubes cylindriques uniformes. Puis, la méthode est appliquée à des nanotubes chiraux ainsi qu'à des structures multifilaires complexes couramment rencontrées dans les câbles de transport d'énergie, composées de deux couches de fils hélicoïdaux torsadés dans des directions opposées.

Identification of apparent elastodynamic properties of 2D periodic architected materials

Saad El Ouafa¹, Nicolas Auffray², Giuseppe Rosi³

¹ Laboratoire Modélisation et Simulation Multi-Echelle, CNRS UMR 8208, F-77454 Marne-la-Vallée, France

² Institut Jean Le Rond d'Alembert, CNRS UMR7190, 75252 Paris Cedex 05, France

³ Laboratoire Modélisation et Simulation Multi-Echelle, CNRS UMR 8208, F-94010 Creteil, France

10/05/2023
14h
T1

The properties of elastic waves propagating within architected media have been the subject of recent investigations. The study of wave propagation and its

interaction with the periodic microstructure of architected materials for very long wavelengths has shown that a homogeneous continuum of Cauchy type can correctly describe the behaviour of such materials. However, as the frequency or the wavenumber increases, the behaviour becomes more complex and hence Classical elasticity is not rich enough to capture specific physical phenomena, such as dispersivity for instance. The elastodynamic homogenization method based on the Floquet-Bloch analysis allows to characterise the effective properties through the computation of the acoustic tensor, which depends on the directions of propagation and the symmetry class of the material. It is worth noting that, assuming a specific symmetry class, some information concerning the material might be lost. However, the identification of effective properties becomes difficult since no particular assumptions are involved with respect to the symmetry class of the effective elasticity tensor. In this talk, we propose a parameterisation of the acoustic tensor using the harmonic decomposition of a generic elasticity tensor. The acoustic tensor's invariants will be expressed as a function of this decomposition's elements, for a given direction of propagation.

Estimating the effect of operational loading condition from ultrasonic guided wave measurements using an iterated Unscented Kalman Filter

10/05/2023
17h30
T4

André Dalmora^{1,2,3}, Alexandre Imperiale¹, Sébastien Imperiale^{2,3}, Philippe Moireau^{2,3}

¹ Université Paris-Saclay, CEA, List, F-91120, Palaiseau, France

² Inria, Project-Team M Ξ DISIM, Inria Saclay-Île-de-France, 91128 Palaiseau, France

³ LMS, École Polytechnique, CNRS, Institut Polytechnique de Paris, 91128 Palaiseau, France

In leading-edge industrial applications, assessing structural integrity is an important aspect of safety requirements. Structural Health Monitoring (SHM) proposes to use sensors and signal processing units *in situ*. One of the most attractive SHM techniques relies on ultrasonic guided waves. Operational conditions can change wave propagation and therefore affect the interpretation of recorded signals [1]. Modeling and simulation can be helpful tools for the design or the reliability assessment of SHM solutions. In [2], we have proposed a wave propagation model to take into account effects of operational conditions such as internal stresses caused by mechanical loading.

In this work, we develop a strategy for estimating these load-induced (large) deformations from ultrasonic measurements. In the context of least-squares optimization, we minimize the difference between measurements and the observed direct model. Among the available methods there exist variational methods, such as *Full Waveform Inversion* [3], and sequential approaches, such as *Kalman Filtering*. As the linearized aspect of the direct model leads to an unwieldy tangent dynamics, tangent-free methods are preferable. After reducing the dimension of the parametric space by decomposing the deformation on selected eigenmodes of a static problem, we apply iteratively the *Reduced-Order Unscented Kalman Filter* [4] as estimation

method. We will show how this method can be understood as a gradient free alternative to an iterated Gauss-Newton based minimisation of the least squares functional, or incremental 4D-variational method. Moreover it allows to launch multiple direct solvers in parallel leading to an efficient exploration of the parametric space and sensitivity analysis *w.r.t.* extended sets of eigenmodes. We illustrate the proposed inversion strategy by applying it to realistic cases.

References

- [1] Gorgin, R. et al. 2020. “Environmental and Operational Conditions Effects on Lamb Wave Based Structural Health Monitoring Systems : A Review.” *Ultrasonics*.
- [2] Dalmora, A. et al. 2022. “A Generic Numerical Solver for Modeling the Influence of Stress Conditions on Guided Wave Propagation for SHM Applications.” 49th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation.
- [3] Virieux, J. et al. 2014. “An Introduction to Full Waveform Inversion.” In *Encyclopedia of Exploration Geophysics, Geophysical References Series*.
- [4] Moireau, P. and Chapelle, D. 2011. “Reduced-Order Unscented Kalman Filtering with Application to Parameter Identification in Large-Dimensional Systems.” *ESAIM : Control, Optimisation and Calculus of Variations*.

Homogenization and stability of periodic solutions for the Sine-Gordon equation

Sergey Gavriluk¹, Bruno Lombard²

¹ IUSTI, Aix Marseille Univ, CNRS, Polytech, Marseille, France

² LMA, Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, Marseille, France

10/05/2023
18h00
T1-T2

The sine-Gordon equation is used in many areas of mathematical and non-linear wave physics. It describes phenomena as diverse as the dynamics of dislocations, the unfolding of a DNA ribbon, etc. We are interested here in the sine-Gordon equation in a 1D h -space periodic medium, with density ρ_h , Young’s modulus E_h and coupling coefficient γ_h :

$$\rho_h(x) \partial_t^2 u_h - E_h(x) \partial_x^2 u_h + \gamma_h(x) \sin u_h = s(x, t). \quad (2)$$

For wavelengths longer than h , we determine the effective equation satisfied by the macroscopic field u_0 (figure 4).

We then study the stability of periodic solutions of the leading-order equation. For this purpose, we use Whitham’s modulation theory, which leads to elliptic equations. The envelope of the periodic solution is therefore unstable. To study the evolution of this instability, we place ourselves in the particular case of travelling waves of low energy and high speed. The classical methods of non-linear waves (Riemann invariants, hodograph method) lead to the Saint-Venant (SV) equations with negative gravity. An exact solution to the elliptic SV equations is found. The time of occurrence of a gradient catastrophe for this solution is in agreement with numerical simulations.

Reference

G.B. WHITHAM, *Linear and Nonlinear Waves*, Wiley & Sons, 1974.

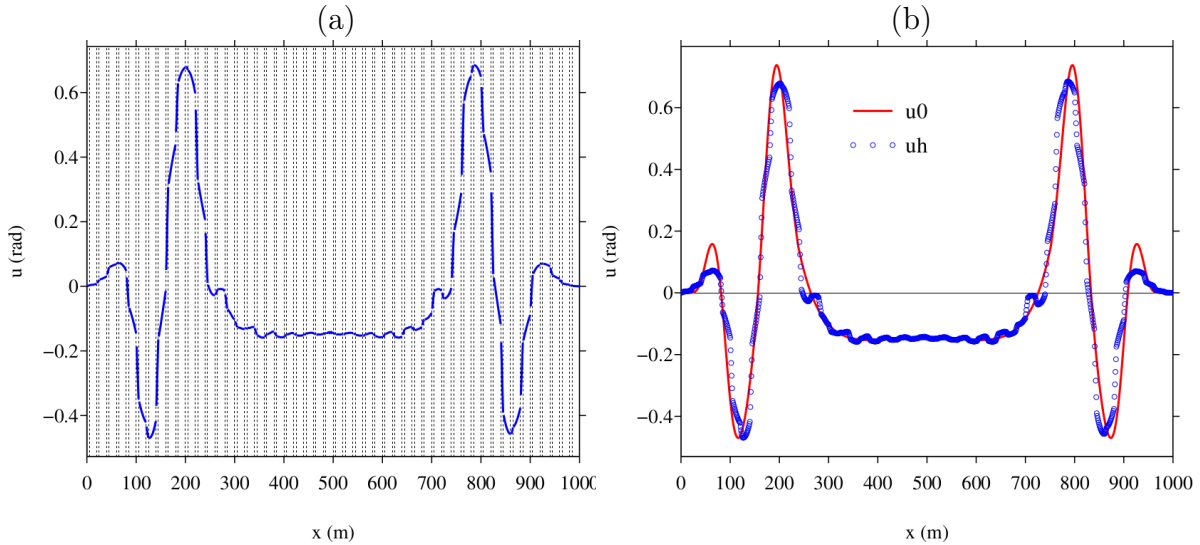


FIGURE 4 – Snapshot of u_h emitted by a source point at the center of the domain (a). Comparison with the leading-order field u_0 (b).

Locally implicit time schemes for transient visco-elastic wave propagation problems on non-uniform meshes

10/05/2023
18h30
T3

Vinduja Vasanthan¹, Alexandre Imperiale¹

¹ Université Paris-Saclay, CEA, List, F-91120, Palaiseau, France

In the context of nondestructive evaluation, Ultrasonic Testing (UT) is popular across numerous industrial fields. Building efficient numerical schemes for high-frequency transient wave propagation to model the UT experiments is relevant and can be challenging depending on the considered configurations. Combining high-order lumped finite elements with explicit time schemes is a popular approach [1] for either inviscid or visco-elastic models [2]. Such schemes have proven to be efficient and fast when considering quasi-uniform meshes. However, when dealing with non-uniform meshes, the CFL condition is constrained by the most degenerate element of the mesh. We can encounter such meshes when dealing with "unfortunate" CAD input file, in particular when meshing with quadrilaterals or hexahedra. In fact, most meshing softwares can produce distorted elements when confronted with sharp-angled CAD, which leads to a deteriorated CFL condition. Non-uniform meshes may also appear when dealing with particular applications, *e.g.*, multiple inclusions in an otherwise sound domain, which can be very close to each other and produce very small elements in-between them. Thus, in such contexts, the resolution of the problem can be quite time-consuming due to the CFL becoming drastically stringent.

In this work, we propose to adapt the locally implicit time schemes [3] to visco-elastic models in order to obtain robust fully discrete schemes *w.r.t.* mesh non-uniformities. These schemes essentially boil down to identifying penalizing parts of the stiffness bilinear forms, and to applying an implicit scheme at the fully discrete level, whereas the remaining part of the weak formulation is treated explicitly. In practice, the penalizing parts of the stiffness forms correspond to integrals over *a priori* selected subparts of the mesh made of the most degenerate elements. To select

these elements, we perform an analysis on the given mesh by computing the local spectral radii of each element and selecting the ones which are higher than a certain chosen factor. We can prove using energy arguments that the global CFL does not depend on the problematic cells anymore, and can be greater than a fully-explicit scheme, decreasing the number of iterations for a fixed time window. However, this implies solving linear systems for the problematic elements at each time step, which can be a costly process, especially in 3D. Thus one needs to carefully balance the cost of the resolution of linear systems with the gain in the CFL condition in order to increase the overall performance of the locally implicit scheme compared to the fully-explicit scheme. We present 2D and 3D numerical test cases for visco-elastic models in a nondestructive testing context.

[1] G. C. Cohen. Higher-order numerical methods for transient wave equations. 2003.

[2] A. Imperiale et al. “Numerical modeling of wave propagation in anisotropic viscoelastic laminated materials in transient regime : Application to modeling ultrasonic testing of composite structures”. In : International Journal for Numerical Methods in Engineering (2020).

[3] T. Rylander et al. “Stability of explicit–implicit hybrid time-stepping schemes for Maxwell’s equations”. In : Journal of Computational Physics (2002).

Ultrasonic bandgaps in viscoelastic 1D-periodic media achieved by multi-material additive manufacturing

Max Gattin ¹, Nicolas Bochud ¹, Giuseppe Rosi ¹, Quentin Grossman ²,
Davide Ruffoni ² and Salah Naili ¹

¹ Univ Paris Est Creteil, Univ Gustave Eiffel, CNRS, UMR 8208, MSME, F-94010
Créteil, France

² Mechanics of Biological and Bioinspired Materials Laboratory, Department of
Aerospace and Mechanical Engineering, University of Liège, Quartier Polytech 1, Allée de
la Découverte 9, B-4000 Liège, Belgium

11/05/2023
11h00
T1

Biological tissues have mechanical and functional properties that are extremely difficult to replicate. They are intrinsically multi-scaled, architected and heterogeneous materials [1], whose outstanding features are the result of a smart arrangement of the basic constituents at different length scales. From a mechanical viewpoint, their unique properties at the tissue scale are hypothesized to result from the combination of two main factors [2], namely (i) the contribution of material ingredients (i.e., soft and hard viscoelastic constituent materials) and (ii) the presence of mechanistic ingredients (i.e., spatial organization of the constituents including periodic microstructure and functional gradients of mechanical properties). In this context, the rational design of architected orthopedic implants that display an acoustic signature reflecting the microstructure could open the way towards the development of ultrasound characterization methods for the monitoring of their integration to the surrounding biological environment. To this end, it is necessary to have a precise knowledge of the acoustic properties of the constituent materials in the ultrasonic regime, as well as to accurately model the effect of the microstructure, in particular when the size of the unit cell is comparable to the wavelength.

In this work, we will discuss the capability of a multi-material additive manufacturing technique to design and fabricate micro-architected periodic media with programmable ultrasonic responses, with the aim of replicating such multiphase periodic structures formed by sub-millimeter unit cells in a laboratory-controlled environment. In a first part, the viscoelastic properties of the constituent materials will be assessed by characterizing macroscopically homogeneous samples, which exhibit dispersive losses that are described using a frequency power law model [3]. In a second part, the retrieved properties will be used to feed models of the transmission of longitudinal ultrasound waves propagating through 1D-periodic biphasic samples [4].

References :

- [1] P. Fratzl, and R. Weinkamer. Nature’s hierarchical materials. *Prog. Mater. Sci.*, 52(8), 1263-1334, 2007.
- [2] A. A. Zadpoor. Meta-biomaterials. *Biomater. Sci.*, 8(1), 18–38, 2020.
- [3] M. Gattin, N. Bochud, G. Rosi, Q. Grossman, D. Ruffoni, and S. Naili. Ultrasound characterization of the viscoelastic properties of additively manufactured photopolymer materials. *J. Acoust. Soc. Am.*, 152(3), 1901–1912, 2022.
- [4] M. Gattin, N. Bochud, G. Rosi, Q. Grossman, D. Ruffoni, and S. Naili. Ultrasonic bandgaps in viscoelastic 1D-periodic media : Mechanical modeling and experimental validation. *Ultrasonics*, 2023.

11/05/2023
11h30
T1-T4

Optimisation topologique d’interfaces microstructurées

Rémi Cornaggia¹, Marie Touboul², Cédric Bellis³

¹ Institut Jean Le Rond ∂^2 Alembert, Paris, France

² Department of Mathematics, Imperial College London, London, UK

³ Laboratoire de mécanique et d’acoustique, Marseille, France

On s’intéresse à des interfaces microstructurées périodiquement, par exemple une rangée d’inclusions, séparant deux milieux homogènes. Dans le régime des grandes longueurs d’ondes devant la période spatiale de la microstructure, les propriétés effectives de ce type d’interface peuvent être décrites par des conditions de transmission au travers d’une interface équivalente [1]. Les coefficients entrant en jeu dans ces conditions sont calculés via la résolution de problèmes élémentaires posés sur des “bandes” représentatives de la microstructure [1,2].

En s’appuyant sur ce modèle effectif, on propose une méthodologie d’optimisation topologique de ces interfaces pour obtenir des effets macroscopiques “cibles” tels que l’atténuation des ondes transmises dans des directions spécifiques. Cette méthodologie, déjà utilisée pour l’optimisation de milieux architecturés 2D [3], repose sur le calcul de dérivées topologiques des coefficients du modèle effectif pour diriger un algorithme de minimisation de fonctions-coût. De plus, ces dérivées topologiques sont utilisées en amont pour déterminer des microstructures constituées d’inclusions elliptiques “optimales” choisies comme initialisations de l’algorithme de minimisation.

Pour l’implémentation de cette méthode, un outil dédié à la résolution des problèmes élémentaires de “bande” a été développé [2], et des contraintes de volume et de périmètre des inclusions garantissent la convergence de l’algorithme vers des

microstructures “réalisables” [4, Chap. 4]. Des exemples de telles microstructures seront présentés.

[1] Marigo, J.-J. ; Maurel, A. ; Pham, K. & Sbitti, A. Effective Dynamic Properties of a Row of Elastic Inclusions : The Case of Scalar Shear Waves *Journal of Elasticity*, 2017

[2] Cornaggia, R. ; Touboul, M. & Bellis, C. FFT-based computation of homogenized interface parameters *Comptes Rendus Mécanique*, 2022

[3] Cornaggia, R. & Bellis, C. Tuning effective dynamical properties of periodic media by FFT-accelerated topological optimization *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2020

[4] Touboul, M. "Acoustic and elastic wave propagation in microstructured media with interfaces : homogenization, simulation and optimization", *Ph. D. thesis, Aix-Marseille Université*, 2021

Superresolved Imaging Based on Spatiotemporal Wave-Front Shaping

Guillaume Noetinger¹, Samuel Métais², Geoffroy Lerosey³, Mathias Fink¹,
Sébastien M. Popoff¹, Fabrice Lemoult¹

¹ Institut Langevin, ESPCI Paris, Université PSL, CNRS, Paris 75005, France

² Aix Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, Marseille, France

³ Greenerwave, Paris 75002, France

11/05/2023
14h00
T1

The optical microscope is a fundamental tool for scientists. According to the wave model of light, its resolution is limited to a few hundred nanometers, the diffraction limit. The so-called "superresolution" methods developed in recent years have made it possible to push this limit to a few nanometers but they are based on the use of potentially toxic fluorescent molecules, which limits their applications.

We propose an original method of super-resolution based solely on wave physics. The guiding idea is that the image produced by an imaging device, in the case of a microscope, depends not only on the device itself, but also on the way the observed object is illuminated. Instead of a constant illumination directed along the optical axis, we have imagined an illumination by a source rotating about the optical axis. Due to the Doppler effect, this rotating illumination leads to a singularity on the optical axis : only a point-like scatterer on the axis backscatters a monochromatic wave since the distance between the source and this scatterer is constant. An eccentric scatterer, on the other hand, returns a frequency modulated signal because, in this case, the source moves away from and toward the emitter.

This concept has been implemented on an acoustic imaging experiment that offers more flexibility than an optical experiment. By using such a rotating sound source, instead of obtaining a single image of the object in conventional imaging, spatiotemporal data about an object is collected. These data are richer in information about the object than a classical image, with a simple mathematical procedure we condense all this information into several images of the same object. On these new images, the rotational movement is translated into the creation of phase vortices. By imaging a single point, we see that the resolution of this system is already

better than conventional imaging. By exploiting this new information to the maximum, we finally obtain a final image of the object with an even better resolution. This method can certainly be applied to microscopy but also to other fields such as ultrasound imaging or telecommunication.

Résonance linéaire et non linéaire de défaut dans une plaque d'aluminium

11/05/2023

14h30

T2

Biaou Jean-Baptiste KOUCHORO^{1,2}, Anissa MEZIANE¹, Philippe MICHEAU²,
Mathieu RENIER¹, Nicolas QUAEGBEUR²

¹ Univ. Bordeaux, CNRS, Arts et Metiers Paris Tech, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295, F-33400, Talence, France.

² CRASH-UdeS, Département de Génie Mécanique, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada.

Les ondes ultrasonores guidées telles que les ondes de Lamb, qui sont de plus en plus utilisées pour l'inspection de structures métalliques et composites permettent de générer des phénomènes de résonance locale par leur interaction avec une zone endommagée, permettant ainsi la détection de défauts. Lorsqu'elles sont soumises à un mouvement de grande amplitude, un comportement non linéaire peut prédominer localement dans la zone endommagée. Ce travail présente un modèle numérique et expérimental d'une résonance locale linéaire et non linéaire dans une plaque sous l'excitation induite par un mode de Lamb incident.

Pour cette étude, le dispositif expérimental développé est un trou à fond plat (Flat Bottom Hole : FBH) réalisé dans une plaque d'aluminium. Les modes du FBH sont excités aux fréquences de résonance par un actionneur (sonotrode) et les mesures de vitesse hors plan sont réalisées à l'aide d'un vibromètre laser à effet Doppler. Ensuite, un modèle d'éléments finis en 2D, développé avec COMSOL Multiphysics a permis de réaliser une étude paramétrique faisant varier les propriétés géométriques du FBH afin de mettre en évidence la sensibilité des fréquences de résonance à l'épaisseur de la plaque. Il est démontré que l'effet de résonance disparaît lorsque le rapport des épaisseurs entre le trou et la plaque est supérieur à 0.5. Le comportement non linéaire du FBH est considéré et étudié en introduisant des non-linéarités géométriques au modèle numérique en considérant la composante non linéaire du tenseur de déformation. De même, une excitation à très forte amplitude a permis de retrouver un comportements non-linéaires (apparition d'harmoniques) dans les résultats expérimentaux.

Effective transmission conditions between fluid and solid domains with non-conform space discretization in transient wave propagation problems

Alexandre Imperiale¹

¹ Université Paris-Saclay, CEA, List, F-91120, Palaiseau, France

11/05/2023
17h30
T3

In leading edge industrial applications, assessing structure integrity is an important aspect of safety requirements, and is often performed using Ultrasonic Testing (UT) methods. They rely on the interaction between high-frequency mechanical waves and potential flaws or material inhomogeneities. Insuring the reliability of a UT method is a challenging task and may require modeling and simulation. In the present communication, we are interested in providing an efficient numerical scheme to represent transient wave propagation for configurations where a fluid domain and a solid domain are separated by a thin coating layer.

This type of configuration entails various computational challenges and bottlenecks : (1) Incorporating the fluid – solid transmission condition in an efficient and stable manner ; (2) The wave velocity being usually significantly lower in the fluid, one needs to resort to non-conforming meshes between the fluid and solid domain in order to recover sufficient performances ; (3) The presence of the thin coating interface necessarily discard any attempt of meshing this interface, since this approach would lead to a restrictive stability condition on the time scheme.

In order to address these issues, the proposed approach – detailed in [1] – combines the mortar element method [2] with so-called effective transmission conditions [3], where the effect of the coating layer is incorporated through spring – mass coefficients at the interface between the fluid and solid domain.

Using discrete energy arguments, we are able to prove that the associated fully discrete scheme is stable upon a stability condition independent of the thin coating layer. Moreover, we provide an efficient time marching algorithm leading to significantly improved performances. After providing numerical evidence that the order of convergence is not deteriorated due to the introduction of the mortar elements, we illustrate the performances of our approach in 2D and 3D configurations, linked to ultrasonic testing experiments modeling.

[1] A. Imperiale. “An energy preserving time scheme based on the mortar element method for effective transmission conditions between fluid and solid domains in transient wave propagation problems”. In : International Journal for Numerical Methods in Engineering (2023).

[2] F. Ben Belgacem et al. “The mortar element method for three dimensional finite elements”. eng. In : ESAIM : M2AM (1997).

[3] S. I. Rokhlin et al. “Analysis of boundary conditions for elastic wave interaction with an interface between two solids”. In : J. Acoust. Soc. Am. (1991).

11/05/2023
18h00
T4

Reconstruction de sources de chaleur volumiques par approche bayésienne – Application à la sonothermographie

Hugo Boué^{1, 2}, Audrey Giremus², Marie-Marthe Groz¹, Anissa Mesiane¹,
Emmanuelle Abisset-Chavanne¹

¹ Institut de mécanique et d'ingénierie (I2M), Talence 33400

² Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système (IMS), Talence 33400

La détection précoce des défauts (tels que les fissures, la délamination des composites, les défauts de collage) est cruciale pour éviter les accidents potentiels dans les environnements industriels. Dans ce contexte, l'évaluation ou le test non destructif (ECND / CND) est essentiel pour éviter toute défaillance désastreuse. Parmi ces techniques de CND, la sonothermographie [4] consiste à coupler des ultrasons puissants et l'imagerie thermique afin de détecter les défauts des matériaux et d'évaluer leur étendue. En présence d'un défaut, l'énergie mécanique induite par les ondes ultrasonores est convertie en énergie thermique, ce qui engendre une source thermique enfouie [2]. En étudiant les champs thermiques et mécaniques résultants, des méthodes inverses peuvent être développées pour reconstruire ces sources de chaleur, permettant l'évaluation des propriétés physiques des matériaux ou des défauts.

Ce travail se concentre sur la reconstruction de sources volumiques dans les matériaux, quelle que soit leur origine, à partir d'images thermiques enregistrées à la surface du matériau, avec une approche bayésienne [7, 5] appelée "GB". Ce problème est mal posé [3, 1] et nécessite l'utilisation d'outils spécifiques pour assurer la reconstruction conjointe de la position et de l'intensité des sources à partir de données expérimentales bruitées. Dans ce travail, une modélisation *a priori* est considérée sous la forme d'un mélange de distributions, favorisant la parcimonie spatiale, régularisant ainsi le problème d'inférence par la probabilité [6]. Cette méthode permet de reconstruire les sources avec une grande fidélité, y compris l'estimation de leur intensité [2], surmontant ainsi les limitations mentionnées dans les travaux précédents (profondeur des sources et bruit de mesure). Les performances de cette méthode sont discutées par rapport au bruit et à d'autres méthodes, montrant un bon potentiel d'applications.

[1] Heinz W. Engl, Charles W. Groetsch et Ill-Posed Problems. "Inverse and Ill-Posed Problems". In : (1er sept. 1987).

[2] Marie-Marthe Groz et al. "Bayesian Inference for 3D Volumetric Heat Sources Reconstruction from Surfacic IR Imaging". In : Applied Sciences 10.5 (28 fév. 2020), p. 1607.

[3] J. Hadamard. "Lectures on Cauchy's problem in linear partial differential equations". In : Yale University Press (1923).

[4] T. Kouadio et al. "Thermal characterization of viscoelastic materials using sonothermography". In : 1581.1 (18 fév. 2014), p. 1671-1678.

[5] Helcio R.B. Orlande et al. "Detection of contact failures with the Markov chain Monte Carlo method by using integral transformed measurements". In : International Journal of Thermal Sciences (2018).

[6] Qiansheng Cheng, Rong Chen et Ta-Hsin Li. "Simultaneous wavelet estimation and deconvolution of reflection seismic signals". In : IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 34.2 (mars 1996), p. 377-384.

[7] Yuxin Zhang et al. "Bayesian approach to a nonlinear inverse problem for a time-space fractional diffusion equation". In : Inverse Problems 34.12 (1er oct. 2018), p. 125002.

Modulation spatio-temporelle d'une poutre molle

Eléonore Duval^{1 2 3}, Johann Asnacios², Stephan Fauve², Vincent Tournat¹,
François Pétrélis², Maxime Lanoy¹

11/05/2023
18h30
T1

¹ Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans (LAUM), UMR 6613, Institut
d'Acoustique – Graduate School (IA-GS), CNRS, Le Mans Université

² Laboratoire de Physique de l'École normale supérieure, ENS, Université PSL, CNRS,
Sorbonne Université, Université Paris Cité, F-75005 Paris, France

³ Université Paris Cité, CNRS, MSC, UMR 7057, F-75013 Paris, France

Un oscillateur paramétrique est un système dont la fréquence propre est modulée périodiquement, via la variation temporelle de l'un de ses paramètres physiques. Lorsque ce paramètre est modulé à environ deux fois la fréquence propre, l'amplitude de l'oscillation augmente de façon exponentielle : c'est ce que l'on appelle une résonance paramétrique (d'autres fréquences de modulation peuvent également conduire à la résonance, mais sont généralement moins efficaces.)

Nous étudions le comportement d'un système dans lequel la fréquence naturelle varie à la fois dans le temps et dans l'espace. Nous utilisons une poutre molle pré-tendue soumise à une excitation longitudinale, ce qui provoque une modulation paramétrique de la tension de la poutre. Nous étudions d'abord le domaine linéaire en caractérisant les différents modes de compression et de flexion. Ensuite, en excitant ce système au voisinage des fréquences propres des modes de flexion, nous observons et étudions la croissance d'instabilités élastiques.

Si à première vue le système semble proche d'un cas classique d'oscillateur paramétrique (similaire à l'expérience de Melde), il s'avère que la dynamique de croissance des instabilités est très différente de ce qui est habituellement observé. Nous proposons un modèle pour expliquer ce phénomène atypique en prenant en compte une modulation spatio-temporelle de la tension de la poutre.

L'étude et la compréhension des comportements instables dans les matériaux mous sont particulièrement intéressants pour des applications en récupération d'énergie ou en robotique molle.

Author Index

- Abisset-Chavanne
Emmanuelle, 16
- Akian
Jean-Luc, 1
- Asnacios
Johann, 17
- Auffray
Nicolas, 7
- Bellis
Cédric, 12
- Bochud
Nicolas, 11
- Bonnet
Luc, 1
- Boutin
Claude, 5
- Boué
Hugo, 16
- Cornaggia
Rémi, 12
- Dalmora
André, 8
- Delory
Alexandre, 3
- Duval
Eléonore, 17
- Eddi
Antonin, 3
- El Ouafa
Saad, 7
- Fauve
Stephan, 17
- Favrie
Nicolas, 2
- Fink
Mathias, 13
- Garnier
Josselin, 1
- Gattin
Max, 11
- Gavrilyuk
Sergey, 9
- Gay
Étienne, 1
- Giremus
Audrey, 16
- Grossman
Quentin, 11
- Groz
Marie-Marthe, 16
- Imperiale
Alexandre, 8, 10, 15
Sebastien, 8
- Kiefer
Daniel, 3
- Kouchoro
Biaou Jean-Baptiste, 14
- Lanoy
Maxime, 3, 17
- Lebbe
Nicolas, 6
- Lemoult
Fabrice, 3, 13
- Lerosey
Geoffroy, 13
- Lombard
Bruno, 2, 9
- Métails

Samuel, 13
Maurel
 Agnès, 2, 6
Mercier
 Jean-François, 1
Meziane
 Anissa, 14, 16
Micheau
 Philippe, 14
Moireau
 Philippe, 8

Naili
 Salah, 11
Noetinger
 Guillaume, 13

Peyret
 Christophe, 1
Pham
 Kim, 2, 6
Popoff
 Sébastien, 13
Prada
 Claire, 3
Pétrélis
 François, 17

Quaegebeur
 Nicolas, 14

Renier
 Mathieu, 14
Rosi
 Giuseppe, 7, 11
Ruffoni
 Davide, 11

Savin
 Éric, 1

Tachet
 Sarah, 2
Touboul
 Marie, 12
Tournat
 Vincent, 17
Treyssede
 Fabien, 7

Vasanthan
 Vinduja, 10
Venegas
 Rodolfo, 5

Zhou
 Changwei, 7