



GDR Groupement
de recherche

ARCHI-META
Architected Metamaterials



Journée de lancement

Institut Langevin, 1 rue Jussieu, 75005 Paris
(Amphithéâtre du Globe)
27.11.2023

Informations et contacts

Site web : <https://gdr-archi-meta.univ-lille.fr>



Liste de diffusion : gdr-archimeta@groupes.renater.fr
inscription sur <https://groupes.renater.fr/sympa/info/gdr-archimeta>



La mission du groupement de recherche ARCHI-META (né le 01.01.2023) est de rassembler les communautés des acousticiens et des mécaniciens autour des « métamatériaux » et des « matériaux architecturés », afin (i) d'identifier et résoudre les enjeux scientifiques communs mis en évidence ces dernières années sur ces thématiques et (ii) de partager les outils théoriques, numériques et expérimentaux propres aux deux communautés pour établir un langage commun.

L'objectif général du GDR est de faire progresser la connaissance et la technologie des « métamatériaux architecturés », en abordant de façon plus efficace les enjeux scientifiques limitants leur développement actuel.

Le GDR couvre un large spectre de champs disciplinaires (de la théorie des groupes à l'homogénéisation multi-échelle, de la bio-inspiration au cristaux temporels, de la modélisation à la fabrication et caractérisation) et applicatifs (isolation acoustique / vibratoire, santé, mécano-biologie, technologie de l'information et de la communication).

— Le bureau ARCHI-META

Programme de la journée

9h30–9h45	Anne-Christine HLADKY-HENNION	6
	Introduction de la journée par INSIS–CNRS	
9h45–10h00	Direction du GdR	6
	Présentation générale du GdR	
10h00–10h45	Massimo RUZZENE	8
	La recherche d'états de bord dans les métamatériaux acoustiques et mécaniques	
10h45 – 10h50	Présentation du GT1 - Théorie : outils théoriques pour le métamatériaux	10
10h50 – 11h20	Agnès MAUREL	10
	Réseau acoustique modulé en temps et en espace	
11h20 – 11h40	Pause café	
11h40 – 11h45	Présentation du GT2 – Géométrie : organisation spatiale et temporelle des métamatériaux	12
11h45 – 12h15	Arthur LEBÉE	12
	Continuum elasticity of Miura Tessellations	
12h15 – 12h20	Présentation du GT3 – Matière : fabrication, essais et durabilité des métamatériaux	14
12h20 – 12h50	Éric CHARKALUK	14
	Matériaux architecturés métalliques : état de l'art et perspectives	
12h50 – 14h15	Pause déjeuner	

14h15 – 14h20	Présentation du GT4 – Applications : applications en ingénierie des métamatériaux	16
14h20 – 14h50	Thomas BRUNET 3D wavefront shaping with soft acoustic meta-lenses	16
14h50 – 15h35	Vincent TOURNAT Contrôle des ondes non linéaires par les métamatériaux mécaniques flexibles	17
15h35 – 16h05	Alberto AMO Topological lattices for efficient light transport	19
16h05 – 16h20	Laetitia ROUX Métamatériaux acoustiques pour la discrétion & furtivité des systèmes sous-marins	20
16h20 – 16h40	Pause café	
16h40 – 16h55	Fabien CHEVILLOTTE Classification des phénomènes non-conventionnels impliqués dans les métamatériaux pour faciliter la compréhension des industriels	21
16h55 – 17h25	Manuel COLLET Programmable metacomposite for controlling noise and vibration	22
17h25 – 17h40	Clôture	

9h30 – 9h45

Introduction de la journée par INSIS–CNRS

Anne-Christine HLADKY-HENNIION

Directrice adjointe scientifique INSIS-CNRS (sections 9, 28 et 7)

9h45–10h00

Présentation générale du GdR

Direction du GdR

Marco MINIACI (IEMN), Giuseppe ROSI (MSME), Nicolas AUF-FRAY (d’Alembert)

Enjeux du domaine et positionnement du GdR

Ces dernières années ont vu une formation « spontanée » de deux sous-communautés autour de la thématique « métamatériaux » : celle des acousticiens et celle des mécaniciens. Toutefois, certaines différences (mineures) de finalité et l’utilisation de langages et de formalismes différents propres aux deux communautés n’ont pas favorisé le dialogue inter-communautaire, même si les sujets investigués et les méthodologies utilisées sont souvent complémentaires. Les temps semblent, donc, mûrs pour que ces sujets mènent à l’avènement d’une nouvelle sous-communauté transverse, qui, d’ailleurs, est en train de se former presque naturellement (en France et à l’international).

Cette exigence d’animation et de structuration est déjà apparue, dans une forme ponctuelle, à plusieurs reprises sur la scène scientifique à travers : (i) plusieurs publications transversales aux deux domaines, (ii) des activités de groupement tel que « Coss&Vita »

(IRP – action internationale du CNRS entre l’Italie et la France autour des « milieux généralisés ») et (iii) le travail effectué dans le précédent GdR META (récemment conclu), qui a tenté d’oeuvrer au rassemblement la communauté des acousticiens travaillant autour des cristaux phononiques et métamatériaux au-delà de leur périmètre académique, tout en posant l’accent sur la nécessité de rajouter un approche plus « mécanique » et « méthodologique » pour pousser la conception des métamatériaux au-delà de l’état actuel.

Objectif long-terme

Dans ce cadre, le GdR ARCHI-META se propose de saisir cette convergence naturelle et d’agir comme catalyseur pour aller au-delà des spécificités liées aux différents champs académiques mentionnés (des acousticiens et des mécaniciens). Par exemple, dans une perspective d’ingénierie, ces métamatériaux, qu’ils soient à finalité statique ou dynamique, doivent être réalisés et intégrés dans un système réel. Les questions liées à leur fabrication, qualification et quantification de leurs propriétés ainsi qu’à l’estimation de leur durée de vie (et la compréhension de leurs modes de dégradation) doivent donc être considérées.

La recherche d'états de bord dans les méta-matériaux acoustiques et mécaniques

Massimo RUZZENE

Department of Mechanical Engineering
University of Colorado Boulder - USA

Les récentes avancées en physique de la matière condensée ouvrent des nouvelles perspectives dans l'ingénierie des bandes et la manipulation des ondes. Plus précisément, la remise en question des concepts de réciprocité, et l'utilisation de la rupture des symétries spatiales peuvent perturber la manière dont les métamatériaux mécaniques et acoustiques sont conçus et utilisés, offrant ainsi la possibilité de fonctionnalités entièrement nouvelles. La propagation topologiquement protégée des ondes aura des implications profondes sur la transmission des informations dans les matériaux, ainsi que sur la manière dont l'énergie peut être guidée et dirigée, permettant ainsi un contrôle ou une atténuation des effets.

La présentation introduira les concepts de base sur l'analyse de la dispersion et de sa topologie. Nous illustrons spécifiquement des configurations de réseaux 1D et 2D dimérisés par des paramétrisations qui rompent systématiquement les symétries spatiales, et qui forment les bases de l'ouverture de bandes interdites non triviales et de l'introduction d'interfaces supportant des modes topologiques.

Ces concepts sont appliqués dans le contexte des surfaces minimales périodiques, offrant ainsi une plateforme pour de nouveaux métamatériaux mécaniques et acoustiques. L'existence des modes de bord dans ces matériaux est démontrée à travers des tests de vibration et de propagation d'ondes effectués sur des surfaces minimales fabriquées de manière additive. Ces tests mettent en évidence le confinement des états de bord topologiquement protégés et la présence de modes de surface dans des matériaux acous-

tiques. Ces études soutiennent la vision des surfaces minimales comme un cadre général où des modulations géométriques et des symétries peuvent être introduites pour obtenir de nouvelles et inhabituelles fonctionnalités mécaniques et acoustiques.

10h45–10h50

Présentation du Groupe de Travail 1 Théorie : outils théoriques pour le métama- tériaux

Résponsables :

Christelle COMBESURE (IRDL), Vincent PAGNEUX (LAUM)

Le premier Groupe de Travail (GT1) concerne la conception d'ou-
tils interdisciplinaires de « modélisation statique et dynamique
» des métamatériaux architecturés. L'objectif principal est de ré-
pondre aux exigences de modélisation requises par les deux com-
munautés. L'accent sera mis sur l'établissement d'un langage com-
mun permettant un échange de connaissances et une « perméabi-
lité » entre les deux communautés.

10h50 – 11h20

Réseau acoustique modulé en temps et en espace

Agnès MAUREL

Institut Langevin

ESPCI

Nous présenterons une analyse théorique et numérique de la dif-
fraction d'ondes acoustiques par des réseaux rigides modulés en
espace et en temps [1]. L'analyse numérique s'appuie sur une mé-
thode multimodale et est rendue possible en explicitant la forme
des modes qui sont des solutions exactes, non couplées, du pro-
blème dans les différentes régions, à l'intérieur et à l'extérieur du
réseau. La dispersion des modes est étudiée en fonction du rap-
port entre la vitesse de modulation et la vitesse du son, ce qui

montre que chaque ordre de diffraction spatial est associé à un ordre de diffraction temporel. Pour un réseau d'extension finie, la solution est obtenue comme une superposition de ces modes, qui se couplent aux interfaces du réseau. Pour un seul ordre de diffraction (condition fixée par la combinaison d'un régime de basse fréquence et d'une faible vitesse de modulation), un modèle homogénéisé est proposé qui fournit une interprétation physique des propriétés de diffusion du réseau [2].

[1] K. Pham, A. Maurel, Diffraction grating with space-time modulation *Journal of Computational Physics*, 469 111528 (2022).

[2] K. Pham, A. Maurel, How space-time modulations modify spoof surface plasmons and scattering properties in acoustic metagratings, *Phys. Rev. B*, 108(2) : 024303 (2023).

11h40–10h45

Présentation du Groupe de Travail 2 Géométrie : organisation spatiale et temporelle des métamatériaux

Résponsables :

Fabrice LEMOULT (ESPCI), Muamer KADIC (FEMTO-ST), Cédric BELLIS (LMA)

Le deuxième Groupe de Travail (GT2) concerne la définition de la géométrie des métamatériaux architecturés qui donne accès à des propriétés spécifiques. Cette démarche, poursuite à travers l'optimisation géométrique, topologique, etc. vise à la détermination d'une architecture optimale pour une propriété considérée.

11h45 – 12h15

Continuum elasticity of Miura Tessellations

Arthur LEBÉE

Laboratoire NAVIER

Ponts Paris-Tech

Origami tessellations are curved two-dimensional discrete shells folded out of a periodic crease pattern. Unlike solid shells, Origami tessellations can morph and access a space of configurations each characterized by the list of folding angles of all creases. Due to inextensibility constraints imposed by Origami kinematics, not all combinations of folding angles are admissible and so the space of admissible configurations, is a priori unknown. In this talk, we present a model of Origami tessellations as continuum, rather than discrete, elastic shells. Most importantly, we suggest an asymptotic theory that translates the local constraints imposed on folding

angles into global constraints weighing on the effective elongations and curvatures of the tessellation. Thus, the theory provides a characterization of the space of kinematically admissible configurations as the set of solutions to a system of nonlinear PDEs. Furthermore, the elastic strain energy required by each configuration is calculated. In conclusion, the elastostatic equilibrium of the tessellation is formulated as a constrained continuous energy minimization problem.

The theory is exemplified in the case of the Miura tessellation. Various finite deformation modes are successfully predicted and constructed numerically under suitable boundary conditions. Notwithstanding the costs of higher analytical complexity and lower accuracy, the suggested theory offers a deeper physical insight into the configuration space of Origami tessellations while significantly reducing calculation time. This compromise should therefore prove beneficial in time-sensitive applications, as for instance is the case when real-time control of Origami tessellations is desired.

12h15–12h20

Présentation du Groupe de Travail 3

Matière : fabrication, essais et durabilité des métamatériaux

Résponsables :

Bruno MORVAN (LOMC), Martin PONCELET (LMPS), Kerem EGE (LVA)

Les métamatériaux architecturés sont organisés sur plusieurs niveaux d'échelles. Leur fabrication et caractérisation (pertes, résilience, comportement dynamique, etc.) est un défi technologique d'actualité. Cela est très important pour comprendre (et modéliser) l'impact des imperfections liées aux procédés de fabrication, afin de se rapprocher le plus possible aux performances attendues théoriquement. Le troisième Groupe de Travail (GT3) représente le trait d'union entre le monde théorique / numérique et le « monde réel », c'est à dire fabriquer des métamatériaux architecturés à partir d'un matériau constitutif et du choix d'un procédé de fabrication donné, nécessairement imparfait, tant géométriquement qu'en ce qui concerne l'état matière (anisotropie, homogénéité, etc.).

12h20 – 12h50

Matériaux architecturés métalliques : état de l'art et perspectives

Éric CHARKALUK
LMS
École Polytechnique

L'essor de la fabrication additive permet depuis quelques années

maintenant de réaliser des pièces et composants métalliques partiellement ou totalement architecturés. Si les structures de type treillis ont dominé dans un premier temps les études et travaux réalisés, au fil des années, de nouvelles architectures ont été introduites. De même, ces structures souvent caractérisées sous sollicitations quasi-statiques le sont aujourd’hui sous des sollicitations beaucoup plus variées, voire extrêmes, non sans quelques difficultés.

Après une courte introduction sur les procédés couramment utilisés en fabrication additive métallique, l’exposé tentera de dresser un état de l’art du domaine en insistant sur les conséquences de ces modes de fabrication sur les variabilités géométriques et micro-structurales obtenus ainsi que sur les difficultés de caractérisation et de modélisation de ces structures complexes. Au-delà de la littérature, il s’appuiera sur différentes contributions des acteurs du GIS Head (Hautes Energies en Fabrication Additive), en particulier dans le domaine de la fatigue, qui illustrent bien les nouvelles perspectives offertes par ces milieux architecturés mais également les points d’attention en terme de fabrication, caractérisation et simulation numérique.

14h15–14h20

Présentation du Groupe de Travail 4 Applications : applications en ingénierie des métamatériaux

Résponsables :

Sarah BENCHABANE (FEMTO–ST), Justin DIRRENBARGER (PIMM),
Julien POITTEVIN (Naval group)

Le quatrième Groupe de Travail (GT4) vise à identifier les domaines d'application dans lesquels les « métamatériaux architecturés » pourraient apporter des nouvelles solutions à des enjeux scientifiques et technologiques encore non résolus.

14h20 – 14h50

3D wavefront shaping with soft acoustic met- alenses

Thomas BRUNET

I2M

Université de Bordeaux

In this talk, I will report a class of flat (or quasi-flat) acoustic lenses with sub-wavelength thicknesses, engineered from soft porous silicone rubbers, for broadband 3D wavefront shaping. The functionalities of these soft gradient-index (or high-index) metasurfaces will be illustrated through various underwater experiments performed at ultrasonic frequencies, thus demonstrating acoustic focusing and vortex beam generation. I will also show you how to make these ultrasonic devices reconfigurable.

Contrôle des ondes non linéaires par les métamatériaux mécaniques flexibles

14h50 – 15h35

Vincent TOURNAT
LAUM, Institut d'Acoustique
Le Mans Université

Le contrôle des ondes mécaniques par des métamatériaux atteint progressivement des niveaux de complexité et de finesse impressionnants, en particulier pour les ondes linéaires et les concepts associés aux matériaux topologiques, hyperboliques, apériodiques, actifs ou encore modulés dans le temps... En contrepartie, le contrôle des ondes non linéaires par des métamatériaux, ainsi que les processus d'ondes associés, sont relativement moins étudiés et donc moins développés. Cela s'explique en partie par la difficulté à concevoir et contrôler les propriétés non linéaires des métamatériaux. Cependant, comme cela s'est produit dans d'autres domaines par le passé, il est attendu une grande richesse des effets non linéaires observables ou contrôlables, et parfois leur caractère incontournable, par exemple aux grandes amplitudes.

Dans cette présentation, je vais parler d'une plate-forme intéressante pour étudier les processus qui mènent in fine au contrôle des ondes mécaniques non linéaires : les métamatériaux mécaniques flexibles désignent une classe de structures architecturées qui peuvent se déformer fortement, de manière élastique, et ainsi exhiber des effets non linéaires géométriques, donc contrôlables et stables. Après une brève revue de ces structures, je passerai à la méthodologie que nous avons utilisée pour les modéliser ainsi qu'à des exemples d'effets non linéaires observés expérimentalement. Dans un second temps, je présenterai des résultats récents sur le design et l'optimisation de ces structures, au-delà d'arrangements

périodiques ou basés sur des concepts maîtrisés, qui font appel à des outils numériques développés pour l'apprentissage profond. Je discuterai dans ce contexte quelques exemples de contrôle d'ondes non linéaires confirmés expérimentalement.

Topological lattices for efficient light transport

15h35 – 16h05

Alberto AMO
Laboratoire PhLAM,
Université de Lille

The structuring of optical materials using the mathematical framework of topology has revolutionised the implementation of photonic crystals for efficient transport of light in a chip. Among the possible applications, topological metamaterials can be employed to fabricate optical waveguides with sharp bends and negligible backscattering in extremely reduced footprints. Topological lasers with large gain areas and topological frequency combs provide interesting routes to unveil novel nonlinear behaviour.

16h05 – 16h20

Métamatériaux acoustiques pour la discrétion & furtivité des systèmes sous-marins

Laetitia ROUX
Naval Group

Les matériaux à fonction acoustique jouent un rôle clé pour la maîtrise et l'amélioration des performances acoustiques de systèmes navals. De tels matériaux sont principalement utilisés en tant que revêtements acoustiques externes d'une coque pour améliorer la discrétion et furtivité de systèmes sous-marins (sous-marin, drone, etc.) ou installés en environnement d'antennes SONAR pour améliorer leur performance en détection.

Dans cette présentation, Naval Group se focalisera sur les notions de discrétion et furtivité acoustique de systèmes sous-marins face aux menaces adverses, ainsi que les différentes technologies de revêtements existantes pour améliorer ses performances acoustiques. Quelques concepts de métamatériaux seront présentés. Avec l'évolution des menaces actuelles et la multiplication d'acteurs sous-marins (tels que les drones), de nouveaux défis émergent dans le domaine des matériaux acoustiques, résultant en une nécessité de faire évoluer les outils de prédiction des performances acoustiques, l'amélioration et la fiabilisation des moyens de caractérisation et de concevoir des solutions innovantes et souveraines face à ces menaces qui couvrent une gamme de fréquences de plus en plus large.

Classification des phénomènes non-conventionnels impliqués dans les métamatériaux pour faciliter la compréhension des industriels

Fabien CHEVILLOTTE
MATELYS

Les métamatériaux sont d'un grand sujet d'intérêt depuis plusieurs années et le nombre de publications sur le sujet augmente de manière exponentielle. La définition de « métamatériaux » diffère souvent d'un auteur à l'autre et les lecteurs sont souvent perdus dans les concepts utilisés. Notre position à l'interface entre les travaux académiques et les besoins des industriels nous amène à régulièrement devoir vulgariser ces travaux et indiquer s'il s'agit d'un nouveau concept « révolutionnaire » ou une combinaison astucieuse de concepts existants.

L'objectif de cette présentation est de tenter de classer les phénomènes non-conventionnels utilisés dans les métamatériaux afin de clarifier les concepts utilisés. Ces concepts peuvent être vu comme une boîte à outils pour les acousticiens afin d'aider au design de solutions innovantes. Cette classification a pour but d'aider à identifier ces concepts en facilitant la lecture des travaux publiés.

Programmable metacomposite for controlling noise and vibration

Manuel COLLET
LTDS
Ecole Centrale de Lyon

Research activities in smart materials and adaptive structures are of a great interest for many years. New technologies are now available for implementing smart cells inside architected material allowing us to design and construct a new class of smart materials that we can call “programmable « metacomposites ». These new generalized composites allow integration of dense and distributed set of smart materials, electronics, chip sets and power supply system inside material, for implementing distributed control strategies. This paves the way to imagine new strategies to control vibroacoustic flow in a large frequency band and implement unconventional behavior such as non-reciprocal wave propagation.

After a state of art of this domain of research, the wave diffusion control by means of piezoelectric metacomposites is firstly presented and analysed. Concepts of energy lensing are also presented. On a second step one deeply presents acoustical wave reciprocity breaking by means of electroacoustic meta-liner. Implementation and industrial applications of an acoustical diode prototype allows to show all the potential of such new technologies. We will end by presenting non-linear acoustic metasurface and its potential for reaching a new class of distributed vibroacoustic programmable behaviors.
