

Projet ANR-16-CE31-0015-01

METAFORET

Programme ANR 2016

| | | |
|----------|--|-----------|
| A | IDENTIFICATION | 2 |
| B | RESUME CONSOLIDE PUBLIC | 2 |
| B.1 | Instructions pour les résumés consolidés publics..... | 2 |
| B.2 | Résumé consolidé public en français..... | 3 |
| B.3 | Résumé consolidé public en anglais..... | 5 |
| C | MEMOIRE SCIENTIFIQUE | 6 |
| C.1 | Résumé du mémoire..... | 6 |
| C.2 | Enjeux et problématique, état de l'art | 7 |
| C.3 | Approche scientifique et technique..... | 9 |
| C.4 | Résultats obtenus..... | 10 |
| C.5 | Exploitation des résultats..... | 15 |
| C.6 | Discussion | 17 |
| C.7 | Conclusions | 18 |
| C.8 | Références | 19 |
| D | LISTE DES LIVRABLES | 27 |
| E | IMPACT DU PROJET | 27 |
| E.1 | Indicateurs d'impact | 27 |
| E.2 | Liste des publications et communications..... | 28 |
| E.3 | Liste des éléments de valorisation..... | 32 |
| E.4 | Bilan et suivi des personnels recrutés en CDD (hors stagiaires)..... | 33 |

Ce document est à remplir par le coordinateur en collaboration avec les partenaires du projet. L'ensemble des partenaires doit avoir une copie de la version transmise à l'ANR.

Ce modèle doit être utilisé uniquement pour le compte-rendu de fin de projet.

A IDENTIFICATION

| | |
|---|---|
| Acronyme du projet | METAFORET |
| Titre du projet | New developments towards seismic metamaterials |
| Coordinateur du projet (société/organisme) | Philippe Roux (ISTerre, Grenoble) |
| Période du projet (date de début – date de fin) | 01/10/2016 30/09-2021 |
| Site web du projet, le cas échéant | https://metaforet.osug.fr/ |

| | |
|-------------------------|--------------------------------------|
| Rédacteur de ce rapport | |
| Civilité, prénom, nom | Philippe Roux |
| Téléphone | 0665657863 |
| Adresse électronique | Philippe.roux@univ-grenoble-alpes.fr |
| Date de rédaction | 15/09/2021 |

| | |
|---|--|
| Si différent du rédacteur, indiquer un contact pour le projet | |
| Civilité, prénom, nom | |
| Téléphone | |
| Adresse électronique | |

| | |
|---|---|
| Liste des partenaires présents à la fin du projet (société/organisme et responsable scientifique) | Institut Langevin (Fabrice Lemoult), Institut Fresnel (Sébastien Guenneau), Imperial College (Richard Craster), Société Ménard (Benoit Quandalle) |
|---|---|

B RESUME CONSOLIDE PUBLIC

Ce résumé est destiné à être diffusé auprès d'un large public pour promouvoir les résultats du projet, il ne fera donc pas mention de résultats confidentiels et utilisera un vocabulaire adapté mais n'excluant pas les termes techniques. Il en sera fourni une version française et une version en anglais. Il est nécessaire de respecter les instructions ci-dessous.

B.1 INSTRUCTIONS POUR LES RESUMES CONSOLIDES PUBLICS

Les résumés publics en français et en anglais doivent être structurés de la façon suivante.

Titre d'accroche du projet (environ 80 caractères espaces compris)

Titre d'accroche, si possible percutant et concis, qui résume et explicite votre projet selon une logique grand public : il n'est pas nécessaire de présenter exhaustivement le projet mais il faut plutôt s'appuyer sur son aspect le plus marquant.

Les deux premiers paragraphes sont précédés d'un titre spécifique au projet rédigé par vos soins.

Titre 1 : situe l'objectif général du projet et sa problématique (150 caractères max espaces compris)

Paragraphe 1 : (environ 1200 caractères espaces compris)

Le paragraphe 1 précise les enjeux et objectifs du projet : indiquez le contexte, l'objectif général, les problèmes traités, les solutions recherchées, les perspectives et les retombées au niveau technique ou/et sociétal

Titre 2 : précise les méthodes ou technologies utilisées (150 caractères max espaces compris)

Paragraphe 2 : (environ 1200 caractères espaces compris)

Le paragraphe 2 indique comment les résultats attendus sont obtenus grâce à certaines méthodes ou/et technologies. Les technologies utilisées ou/et les méthodes permettant de surmonter les verrous sont explicitées (il faut éviter le jargon scientifique, les acronymes ou les abréviations).

Résultats majeurs du projet (environ 600 caractères espaces compris)

Faits marquants diffusables en direction du grand public, expliciter les applications ou/et les usages rendus possibles, quelles sont les pistes de recherche ou/et de développement originales, éventuellement non prévues au départ. Préciser aussi toute autre retombée= partenariats internationaux, nouveaux débouchés, nouveaux contrats, start-up, synergies de recherche, pôles de compétitivités, etc.

Production scientifique et brevets depuis le début du projet (environ 500 caractères espaces compris)

Ne pas mettre une simple liste mais faire quelques commentaires. Vous pouvez aussi indiquer les actions de normalisation

Illustration

Une illustration avec un schéma, graphique ou photo et une brève légende. L'illustration doit être clairement lisible à une taille d'environ 6cm de large et 5cm de hauteur. Prévoir une résolution suffisante pour l'impression. Envoyer seulement des illustrations dont vous détenez les droits.

Informations factuelles

Rédiger une phrase précisant le type de projet (recherche industrielle, recherche fondamentale, développement expérimental, exploratoire, innovation, etc.), le coordonnateur, les partenaires, la date de démarrage effectif, la durée du projet, l'aide ANR et le coût global du projet, par exemple « Le projet XXX est un projet de recherche fondamentale coordonné par xxx. Il associe aussi xxx, ainsi que des laboratoires xxx et xxx). Le projet a commencé en juin 2006 et a duré 36 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de xxx € pour un coût global de l'ordre de xxx € »

B.2 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN FRANÇAIS

Suivre impérativement les instructions ci-dessus.

LA FORET NE TREMBLE PAS...

Considérant qu'une étendue d'arbres pourrait constituer pour les ondes sismiques un ensemble d'éléments absorbant à l'instar d'expériences menées en laboratoire sur des échelles beaucoup plus petites, l'ambition du projet METAFORET est de faire trembler la forêt!

Il s'agit bien de provoquer artificiellement la propagation d'une onde en direction d'une futaie de Pins maritimes et d'en mesurer les conséquences. Un réseau dense de mille capteurs au sein d'une parcelle d'arbres de 20 ans environ mettra en évidence les fréquences pour lesquelles la propagation d'ondes de surface est stoppée. Ceci constituerait alors une démonstration spectaculaire de l'existence de systèmes de résonateurs couplés à l'échelle géophysique avec des applications certaines dans le domaine de la protection parasismique.

En effet, en transposant ces résultats à l'échelle plus grande d'une ville où le rôle des arbres serait joué par des buildings, pourrait-on concevoir dans le futur le design d'une ville qui se comporterait comme une cape d'invisibilité pour les ondes sismiques?

L'expérience METAFORET fut conçue en 2016 pour démontrer que les phénomènes complexes de physique ondulatoire classiquement observés aux méso- et micro-échelles en acoustique et/ou en optique s'appliquent également à l'échelle sismique. En particulier, l'expérience a

montré qu'une forêt dense d'arbres peut se comporter comme un métamatériau localement résonnant pour les ondes sismiques de surface. L'ensemble dense d'arbres ancrés dans le sol crée une courbe de dispersion anormale pour les ondes de surface, qui met en évidence une large bande interdite autour d'une fréquence de résonance des arbres à ~ 45 Hz. Cette démonstration expérimentale a été réalisée par le déploiement d'un réseau sismique dense de ~ 1000 géophones autonomes qui ont fourni des enregistrements sismiques sous l'excitation d'une source vibrante à la transition entre un champ ouvert et une forêt. D'autres équipements ont été déployés (par exemple, radar de sous-sol, vélocimètres dans les arbres), pour permettre des mesures géophysiques complémentaires.

Les principaux résultats de l'expérience METAFORÉT ont été la présence d'une bande de fréquences interdite pour les ondes sismiques de surface (dites ondes de Rayleigh) associée aux résonances de compression et de flexion des arbres, ce qui a confirmé la forte influence qu'une collection dense d'arbres peut avoir sur la propagation des ondes sismiques.

Cependant, l'expérience sismique a également indiqué la nécessité de mieux comprendre les rôles respectifs de ces résonances sur le motif du champ d'onde dans le contexte de la physique des métamatériaux.

Dans la deuxième phase du projet METAFORÉT, nous avons donc procédé par analogie en revenant à l'échelle du laboratoire, sous la forme d'un ensemble dense de tiges verticales fixées à une plaque dont la longueur typique est maintenant de l'ordre de 1 m (figure 1b). Dans le contexte d'un métamatériau localement résonnant, le système plaque-plus-tiges permet d'étudier les rôles respectifs des résonances de flexion et de compression sur l'hybridation des ondes de la plaque, puisque ces résonances induisent une rupture de l'orthogonalité entre les modes d'ondes de Lamb de la plaque libre.

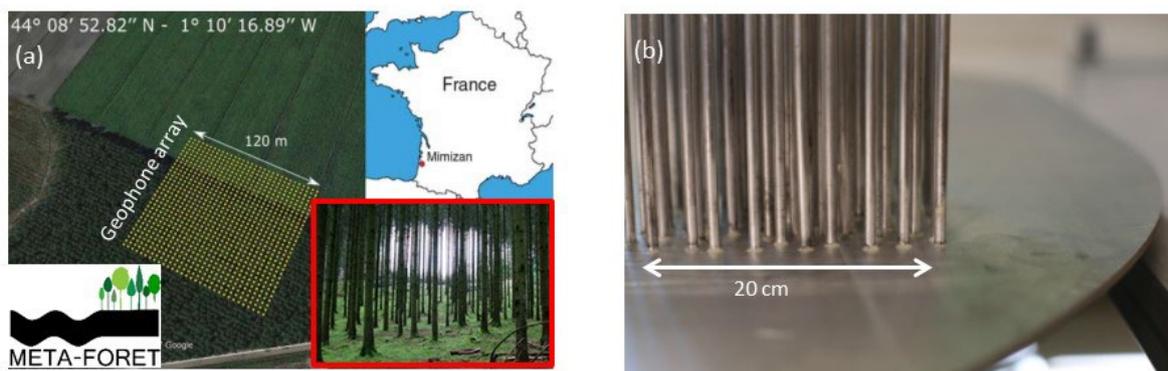


Figure 1 : Exemples de métamatériaux localement résonnants à différentes échelles pour les ondes sismo-élastiques. (a) Déploiement sismique (point jaune) à l'interface entre un champ libre et une forêt dense de pins. (b) Surface carrée d'un arrangement aléatoire de tiges métalliques verticales collées sur une fine plaque d'aluminium à l'échelle du laboratoire.

Le projet METAFORÉT est un projet de recherche fondamentale coordonné par Philippe Roux à ISTERre, Grenoble. Il associe aussi des chercheurs de l'Institut Fresnel (Marseille), de l'Institut Langevin (Paris) et d'Imperial College (Londres). Le projet a commencé en octobre 2016 et a duré 48 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 310 k€.

B.3 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN ANGLAIS

Suivre impérativement les instructions ci-dessus.

THE FOREST DOES NOT TREMBLE...

Considering that an expanse of trees could constitute for the seismic waves a set of absorbing elements following the example of experiments carried out in laboratory on much smaller scales, the ambition of the METAFORET project is to make the forest tremble!

It is indeed a question of artificially provoking the propagation of a wave in the direction of a maritime pine forest and to measure the consequences. A dense network of a thousand sensors within a plot of trees of about 20 years old will highlight the frequencies for which the propagation of surface waves is stopped. This would then constitute a spectacular demonstration of the existence of coupled resonator systems on a geophysical scale with certain applications in the field of earthquake protection.

Indeed, by transposing these results to the larger scale of a city where the role of trees would be played by buildings, could we conceive in the future the design of a city that would behave as a cloak of invisibility for seismic waves?

The METAFORET experiment was designed in 2016 to demonstrate that complex wave physics phenomena classically observed at the meso-and micro-scales in acoustics and/or optics also apply at the seismic scale. In particular, the experiment shows that a dense forest of trees can behave as a locally resonant metamaterial for seismic surface waves. The dense set of trees anchored into the ground creates anomalous dispersion curve for surface wave, which puts in evidence a large frequency bandgap around one resonant frequency of the trees at ~45 Hz.

This experimental demonstration was carried out through the deployment of a dense seismic array of ~1000 autonomous geophones that provided seismic recordings under a shaker source excitation at the transition between an open field and a forest. More equipment was deployed (e.g., GPR, velocimeters in trees), to allow for complementary geophysics measurements.

The main results of the METAFORET experiment were the presence of frequency band gaps for Rayleigh waves associated with compressional and flexural resonances of the trees, which confirmed the strong influence that a dense collection of trees can have on the propagation of seismic waves [Roux et al., 2018].

However, the seismic experiment also indicated the need to better understand the respective roles of these resonances on the wavefield pattern in the context of metamaterial physics. We thus proceed by analogy going back to the laboratory scale, as a dense set of vertical rods attached to a plate with typical length now of the order of 1 m (see above Fig. 1b). In the context of a locally resonant metamaterial, the plate-plus-rods system allows the study of the respective roles of flexural and compressional resonances on the hybridization of the plate waves, as these resonances induce a break in the orthogonality between the Lamb wave modes of the free plate.

The METAFORET project is a fundamental research project coordinated by Philippe Roux at ISTERre, Grenoble. It also involves researchers from Institut Fresnel (Marseille), Institut Langevin (Paris) and Imperial College (London). The project started in October 2016 and lasted 48 months. It received an ANR grant of 310 k€

C MEMOIRE SCIENTIFIQUE

Maximum 5 pages. On donne ci-dessous des indications sur le contenu possible du mémoire. Ce mémoire peut être accompagné de rapports annexes plus détaillés.

Le mémoire scientifique couvre la totalité de la durée du projet. Il doit présenter une synthèse auto-suffisante rappelant les objectifs, le travail réalisé et les résultats obtenus mis en perspective avec les attentes initiales et l'état de l'art. C'est un document d'un format semblable à celui des articles scientifiques ou des monographies. Il doit refléter le caractère collectif de l'effort fait par les partenaires au cours du projet. Le coordinateur prépare ce rapport sur la base des contributions de tous les partenaires. Une version préliminaire en est soumise à l'ANR pour la revue de fin de projet.

Un mémoire scientifique signalé comme confidentiel ne sera pas diffusé. Justifier brièvement la raison de la confidentialité demandée. Les mémoires non confidentiels seront susceptibles d'être diffusés par l'ANR, notamment via les archives ouvertes <http://hal.archives-ouvertes.fr>.

Mémoire scientifique confidentiel : non

C.1 RESUME DU MEMOIRE

Ce résumé peut être repris du résumé consolidé public.

Pourquoi la physique complexe des ondes devrait-elle se limiter à des expériences à très petite échelle ? Les ondes obéissant à des équations de propagation similaires quelle que soit leur origine, pourquoi y a-t-il si peu d'observations des effets de la physique ondulatoire avancée à l'échelle de la géophysique, par exemple ? Bien entendu, les réponses à ces questions volontairement provocatrices sont multiples. Ce qui peut être réalisé en termes de manipulation et de contrôle des ondes à l'échelle du laboratoire s'avère très fastidieux, voire impossible, à plus grande échelle, où le déploiement de nombreux capteurs autonomes constitue souvent une autre limite pratique.

Ces dernières années, cependant, de vastes domaines des sciences impliquant des données à grande échelle ont connu une révolution technologique. En effet, les sciences de la Terre, et notamment la géophysique, peuvent désormais bénéficier d'une acquisition continue de données sur des réseaux très denses de sismomètres, avec parfois plus de 10 000 capteurs. Ces déploiements de capteurs étaient presque inconcevables il y a seulement 10 ans, et jusqu'à très récemment, ils étaient limités à des expériences géophysiques très coûteuses qui ne pouvaient être financées que par les industries pétrolières et gazières. Toutefois, la technologie a maintenant progressé et les institutions universitaires peuvent désormais obtenir des données expérimentales à l'aide de milliers de capteurs sismiques à un coût abordable. Pour aller plus loin, nous pourrions même être à un stade critique, où la qualité incroyable des mesures géophysiques dépassera bientôt notre compréhension des processus physiques sous-jacents dans les sciences de la Terre.

Le projet METAFORÉT vise à combler cette lacune en termes de manipulation des ondes à grande échelle grâce à une approche multidisciplinaire conçue par une équipe composée de physiciens, de géophysiciens et d'ingénieurs qui partagent un intérêt commun pour la propagation des ondes dans les milieux complexes. En pratique, nous visons à tester expérimentalement une configuration géophysique à partir de laquelle la physique des métamatériaux - induisant une occultation sismique et/ou une protection sismique - peut être démontrée. En pratique, Cette configuration expérimentale traite de l'interaction entre une onde de surface et une forêt naturelle. Chaque arbre de la forêt peut réagir comme un résonateur qui piège une petite partie des ondes sismiques se propageant à la surface de la Terre. Le comportement collectif des arbres, lorsqu'ils sont disposés en une forêt dense (avec plusieurs arbres dans une même longueur d'onde sismique), est alors analogue à la physique observée à très petite échelle dans les métamatériaux optiques, lorsque des ondes électromagnétiques interagissent avec des nanomatériaux.

Cette approche multidisciplinaire et multi-échelle a eu un fort impact dans la communauté scientifique et auprès du grand public car elle a démontré la capacité de modéliser le flux des ondes sismiques. Nous pensons également que ce projet mènera dans le futur à d'importantes applications en géophysique et en génie civil. Par exemple, les bandes de fréquences interdites ou "bandes interdites" pourraient être exploitées pour annuler le bruit sismique ambiant à des endroits où les vibrations du sol sont un problème pour des mesures scientifiques très sensibles (par exemple, les vibrations locales de grandes lentilles astronomiques). De même, les bandes interdites pourraient être utilisées pour protéger les structures sensibles, comme les centrales électriques, des ondes de surface potentiellement destructrices provoquées par les tremblements de terre. La conception d'une forêt (qui pourrait éventuellement être constituée de colonnes enterrées) capable de "cacher" tout type de structure humaine des dommages causés par les événements sismiques grâce à une "cape d'invisibilité" naturelle constituerait une révolution sociétale dans le domaine de la protection contre les risques sismiques.

C.2 ENJEUX ET PROBLÉMATIQUE, ETAT DE L'ART

Présenter les enjeux initiaux du projet, la problématique formulée par le projet, et l'état de l'art sur lequel il s'appuie. Présenter leurs éventuelles évolutions pendant la durée du projet (les apports propres au projet sont présentés en C.4).

Etat de l'art sur les métamatériaux sismiques

Les forêts ont été étudiées dans les années 1990 pour leurs propriétés de diffusion des ondes acoustiques dans l'air. Cependant, la faible sensibilité des microphones et la difficulté de mettre en place un grand nombre de sources acoustiques et de microphones dans des conditions extérieures ont limité une telle analyse à la mesure d'un coefficient d'atténuation associé à la fois à la diffusion du feuillage et du tronc. Plus récemment, les propriétés acoustiques d'une collection dense de bambous régulièrement ordonnés ont été étudiées à l'échelle du laboratoire et se sont avérées se comporter comme un cristal phononique avec la présence de bandes interdites de fréquence.

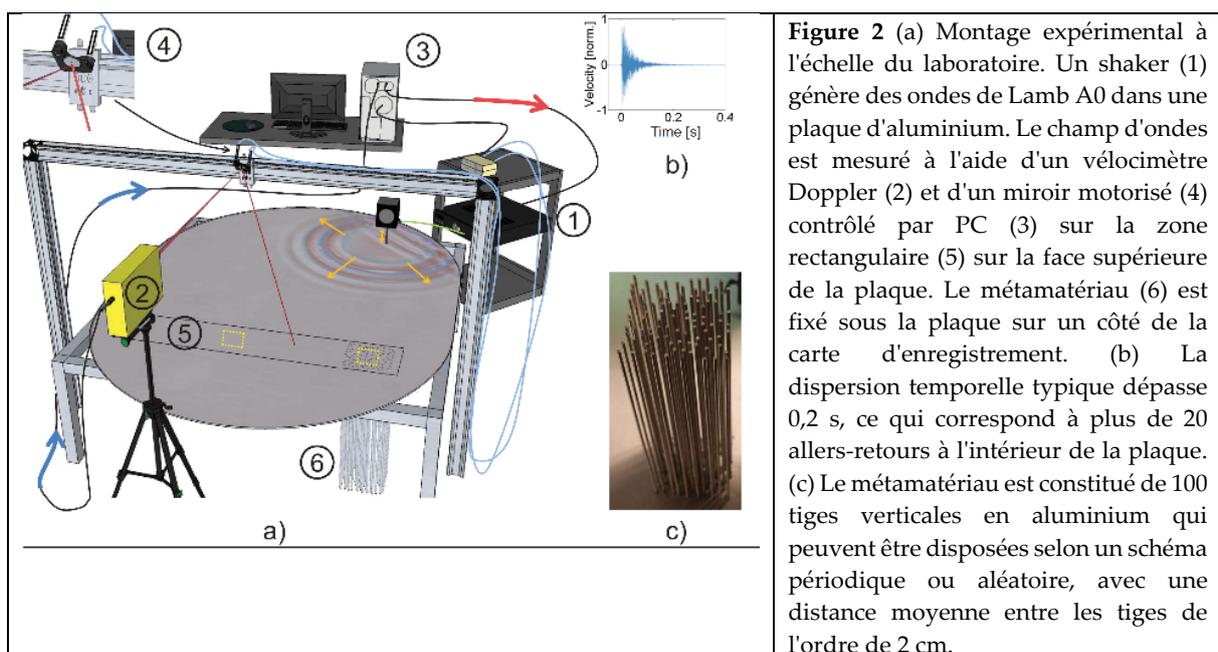
Le projet META-FORÉT est complètement différent de ces deux approches, car nous avons l'intention de traiter des ondes sismiques de surface qui se propagent dans le sol (et non dans

l'air) en interagissant avec (1) une collection dense d'arbres verticaux couchés sur le sol et (2) de longues inclusions cylindriques en béton enterrées dans le sol.

En tant que métamatériau sismique, nous avons montré à travers le projet METAFORÉT qu'une forêt induit des bandes interdites où aucune énergie sismique ne peut se déplacer, ainsi que des courbes de dispersion complexes qui génèrent des modes sub-longueur d'onde et supra-longueur d'onde. En outre, en supposant que la forêt soit correctement conçue, avec des arbres de différentes hauteurs, nous pensons qu'il peut également y avoir des bandes de fréquences à indice de réfraction négatif, générant ainsi un phénomène d'occultation, également appelé "cape d'invisibilité".

La démonstration que la physique des métamatériaux existe à très grande échelle dans notre environnement naturel constitue une percée majeure dans ce domaine de recherche très actif. En effet, relativement peu d'expériences à l'échelle mésoscopique (par exemple, à l'échelle du mètre ou plus) ont été réalisées à ce jour avec des métamatériaux, la plupart des applications pratiques ayant porté jusqu'à présent sur des ondes optiques à l'échelle du millimètre, voire du micromètre. La possibilité d'appliquer et de démontrer expérimentalement que la même physique peut être observée à l'échelle géophysique (par exemple, des échelles allant de 10 m à 100 m) est objectivement un résultat frappant.

Depuis 2013, P. Roux et son équipe ont étudié la propagation des ondes élastiques dans un système formé par un ensemble de tiges d'aluminium collées sur une fine plaque d'aluminium (1,5 m × 1,5 m, voir figure 2). Un ensemble de 100 longues tiges (longueur, 61 cm) a été fixé perpendiculairement à la plaque à l'intérieur d'un carré de 20 cm × 20 cm. Ces tiges fines (diamètre, 6 mm) forment un ensemble de résonateurs quasi ponctuels qui étaient comparables à la longueur d'onde moyenne des ondes de flexion dans la plaque (~0,2 m) dans le plan de propagation des ondes. Il était possible de disposer ces tiges de manière périodique ou aléatoire à une échelle inférieure à la longueur d'onde.



La combinaison de ces 100 tiges collées sur la plaque a fourni un métamatériau original à l'échelle mésoscopique, imitant l'expérience forestière à l'échelle du laboratoire. En raison de la forte réverbération aux limites de la plaque, l'expérience a montré un champ d'ondes diffus complexe à l'intérieur de la plaque, incluant de larges bandes interdites à l'intérieur du métamatériau. En collaboration avec F. Lemoult à l'Institut Langevin (Paris) et S. Guenneau à l'Institut Fresnel (Marseille), les approches expérimentales et numériques ont confirmé le phénomène d'hybridation entre le mode A0 de flexion dominant dans la plaque et les résonances de compression à l'intérieur des tiges.

Dans ce contexte, l'objectif du projet META-FORET fut de dévoiler le lien entre les expériences métamatériaux réalisées avec des tiges collées sur une plaque à l'échelle du laboratoire et la démonstration qu'une forêt (constituée d'arbres réguliers ou de colonnes de béton enterrées) peut se comporter de la même manière à l'échelle géophysique pour les ondes sismiques, en utilisant le déploiement d'un réseau sismique dense pour cartographier la complexité du champ d'ondes.

C.3 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Nous avons organisé le projet META-FORET comme un projet de quatre ans consistant en :

- (1) La réalisation de deux expériences géophysiques spectaculaires employant une grille dense de capteurs sismiques pour les deux différents types de métamatériaux sismiques,
- (2) la réalisation d'une série d'expériences à l'échelle du laboratoire pour préparer les expériences géophysiques à grande échelle. Celles-ci sont nécessaires afin d'anticiper et de comprendre la configuration géométrique optimale pour la distribution des arbres et/ou des inclusions de béton pour l'annulation et la flexion des ondes sismiques de surface,
- (3) Un grand nombre de simulations numériques ainsi que des études théoriques dans des milieux géophysiques 2D et 3D pour la propagation des ondes de surface interagissant avec des métamatériaux sismiques localement résonnants (forêts d'arbres) et des milieux hétérogènes avec un indice de réfraction effectif anisotrope (colonnes de béton enterrées).

Pour optimiser le potentiel à haut risque/à haut gain du projet, les partenaires ont cherché au maximum à anticiper les résultats des expériences sismiques à l'avance. Cette capacité anticiper nos résultats fut assurée par des simulations numériques 2D et 3D qui reproduisent la configuration expérimentale et simulent la propagation des ondes élastiques avec des propriétés physiques réalistes pour le sol et les métamatériaux sismiques. De même, l'interprétation des résultats expérimentaux fut effectuée à travers différentes analyses théoriques telles que la théorie des milieux effectifs et les analogies avec l'optique de transformation. Ces différentes approches peuvent être utilisées pour interpréter la collection de résonateurs comme un milieu avec un indice de réfraction effectif anisotrope et dispersif en fréquence pour les ondes sismiques de surface.

Le projet METAFORET est divisé en quatre paquets de travail (WPs), gérés par les quatre partenaires académiques, qui s'étendent sur les quatre années du projet. Ces WP traitent (1) de la démonstration expérimentale qu'une collection dense d'arbres (ou de colonnes de béton

enterrées) peut se comporter comme un métamatériau sismique (WP1), (2) des investigations expérimentales à l'échelle du laboratoire qui préparent et anticipent les expériences géophysiques conçues dans le WP1 et étudient également d'autres configurations expérimentales à grande échelle pour le métamatériau sismique (WP2), (3) les recherches numériques sur les paramètres 3D à l'échelle géophysique (en utilisant le code d'éléments finis SpecFem) qui contrôlent la réponse de la forêt en tant que métamatériau (WP3) et enfin (4) les recherches théoriques sur la description phénoménologique du métamatériau en tant que milieu effectif (en invoquant l'optique conforme et les techniques d'homogénéisation), pour étudier les applications d'occultation à l'échelle sismique (WP4).

C.4 RESULTATS OBTENUS

Positionner les résultats par rapports aux livrables du projet et aux publications, brevets etc. Revisiter l'état de l'art et les enjeux à la fin du projet.

WP1 - Expériences sismiques (leader ISTerre, Grenoble) : Acquisition de données à l'aide d'un réseau dense de 1000 géophones couvrant une configuration propre à démontrer la physique des métamatériaux pour les ondes sismiques traversant une collection dense de résonateurs verticaux (forêt d'arbres).

Le laboratoire ISTerre a préparé et réalisé en octobre 2016 la première expérience géophysique démontrant qu'une forêt dense de pins maritimes se comportait comme un métamatériau pour les ondes sismiques se propageant à la surface de la terre. L'expérience a eu lieu sur un site proposé par le Centre Régional de la Propriété Forestière de Bordeaux dans le cadre de la participation du projet METAFORÉ au pôle de compétitivité Xylofutur. Elle a impliqué une vingtaine de chercheurs / ingénieurs / doctorants et l'ensemble des laboratoires partenaires du projet METAFORÉ ont été présents sur le site au cours de l'expérience. Plus de 1000 capteurs sismiques ont été déployés à l'interface entre une forêt dense et un champ pour un enregistrement continu de deux semaines. D'autres équipements ont été déployés (par exemple, le GPR, des vélocimètres dans les arbres et source shaker), afin de permettre des mesures géophysiques complémentaires complémentaires qui valident les interprétations physiques du champ le champ d'ondes sismiques observé. Par la mise en évidence de bande de fréquence interdite et de courbes de dispersion anormales pour les ondes sismiques, l'expérience METAFORÉ a confirmé que les phénomènes complexes de la physique des ondes classiquement observés aux méso-échelles et aux micro-échelles en acoustique et/ou en optique s'appliquent également à l'échelle sismique. Entre octobre 2019 et mars 2021, un post-doc a été recruté à ISTerre pour approfondir l'analyse de ces données sismiques qui sont accessibles en ligne à partir du site web du projet.

En particulier, nous nous sommes concentrés sur le comportement des ondes de surface dans un milieu géophysique stratifié couplé à des résonateurs sub-longueur d'onde. Nous avons cherché à comprendre avec des mesures croisées multiphysiques et des simulations numériques le lien entre les effets de la structure du sous-sol et la résonance des arbres. En particulier, le couplage entre les modes de surface fondamentaux et d'ordre supérieur fut mis en évidence autour de la fréquence de résonance des arbres, en tenant compte de la longueur d'atténuation, du rapport d'énergie spectrale et de la polarisation des ondes de surface.

Deux résultats principaux doivent être soulignés. Premièrement, nous observons une forte atténuation dans les fonctions de corrélation à deux points à la fréquence de résonance de compression des arbres (Fig. 3). Cette atténuation provient de la diffusion incohérente associée à l'interaction onde de surface-arbres, comme le révèle également le rapport spectral d'énergie entre la forêt et le champ libre. Deuxièmement, un autre signe évident de l'effet de résonance des arbres sur la propagation des ondes de surface est le changement de l'ellipticité du mouvement des particules aux fréquences proches de la résonance des arbres. Bien que les ondes de surface soient clairement affectées par les résonances des arbres, il n'y a aucune preuve d'une bande interdite au sens d'un amortissement soudain et fort et d'une réflexion totale des ondes à l'interface de la forêt. En revanche, en examinant les trois composantes du champ d'ondes, nous pouvons conclure que les arbres créent une fuite qui affecte un mode de surface d'ordre supérieur qui est caractérisé par un type de polarisation différent. Enfin, la réalité du substrat géophysique hétérogène sous la forêt sous-tend finalement le comportement de ce métamatériau localement résonant.

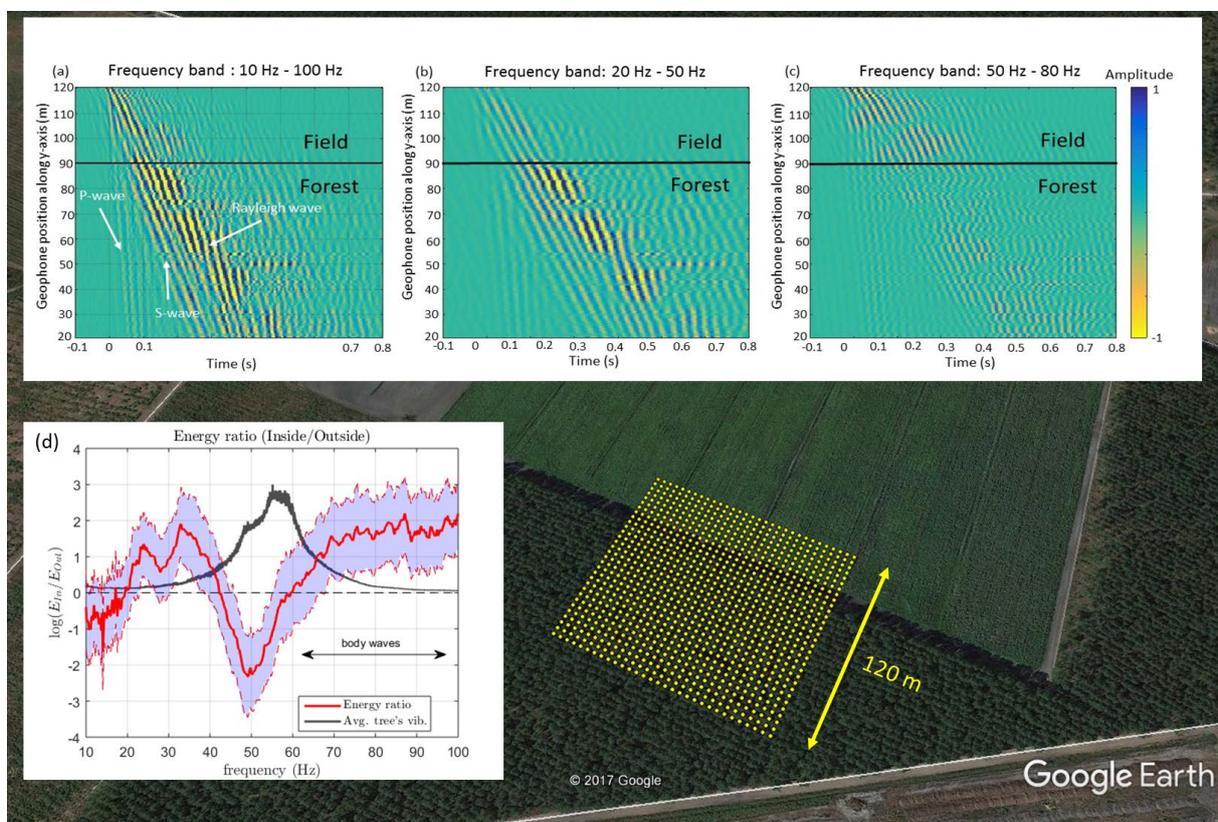


Figure 3 : Vue aérienne du déploiement sismique (points jaunes) de l'expérience METAFORÉT (<https://metaforet.osug.fr/>) à l'interface entre un champ ouvert et une forêt dense près de Mimizan, France. (a)-(c) Représentation spatio-temporelle du champ sismique reçu sur la composante verticale des géophones en réseau linéaire de 100 m de long pour une source vibrante placée dans le champ ouvert. La ligne noire représente la limite forêt-champ. Les trois panneaux correspondent à différents filtrages de fréquence appliqués aux données brutes : (a) données brutes ; (b) bande de fréquence de 20 Hz à 50 Hz ; (c) bande de fréquence de 50 Hz à 80 Hz. Le champ d'ondes sismiques montre une transition claire à la fréquence $F_c = 50$ Hz, qui correspond à la fréquence de résonance moyenne des pins de 12 m de haut (d'après Roux et al, 2018). (d) Rapport d'intensité spectrale (courbe rouge) entre la forêt (E_{in}) et le champ de colza (E_{out}) tracé avec la réponse moyenne des arbres (courbe noire). La zone bleue correspond à l'écart-type autour du rapport d'intensité moyen. La flèche noire indique l'intervalle de fréquence où la contribution des ondes corporelles ne peut être omise.

WP2 - Expériences de laboratoire (leader Institut Langevin, Paris) : Acquisition de données à échelle réduite sur la physique des métamatériaux localement résonants.

Les travaux menés à l'Institut Langevin dans le cadre de l'ANR Metaforet reposent sur le concours de 2 recrutements distincts et donc sur deux axes relativement différents.

Tout d'abord, Simon Yves a été prolongé grâce au soutien de l'ANR pendant quelques mois après la soutenance de sa thèse. Cela a permis d'approfondir les recherches sur les métamatériaux présentant des propriétés de propagation encore plus exotique. Suite à ce travail des analogies entre la modification du résonateur constituant la maille élémentaire et l'arrangement de ceux-ci au sein de la maille ont été étudiées. Il apparaît ainsi que l'arrangement spatial et la fréquence de résonance sont 2 leviers distincts sur lesquels on peut jouer afin de modifier encore plus en profondeur les propriétés de propagation. Nous avons ainsi mis en évidence qu'il était possible de faire un direct analogue de ce pseudo-isolant de Semenoff non pas en modifiant la fréquence de résonance mais en déplaçant astucieusement certains résonateurs. Ainsi des résonances hybrides se créent et jouent le rôle des résonateurs initialement légèrement décalés spectralement. Nous nous sommes attelés sur une démonstration expérimentale avec des ondes acoustiques audibles en utilisant des canettes de soda comme résonateurs, mais ceci se généralise sans problème au cas des arbres au cœur du projet Metaforet. Enfin, nous nous sommes attelés à la rédaction d'un article long qui résume les dernières découvertes dans le domaine de la topologie appliquée aux ondes classiques. Cela a été l'occasion de balayer les différentes stratégies de contrôle des ondes sur une échelle sub-longueur d'onde que nous avons largement étudié au cours de cette ANR.

Dans un deuxième temps, Maxime Lanoy a été recruté en post-doctorat. L'idée, cette fois-ci, a été de revenir au plus près des ondes élastiques à la base du projet Metaforet. En effet, la polarisation des ondes de Rayleigh ou encore des ondes de pur cisaillement jouant un rôle important dans le couplage avec les arbres nous avons voulu revenir au cas d'ondes présentant ces mêmes propriétés. Mais à nouveau, plutôt que de partir sur des dimensions immenses, nous avons voulu rester à l'échelle du laboratoire. Pour cela, nous avons mis au point une plateforme expérimentale qui s'intéresse à des milieux solides quasi-incompressibles. Un élastomère de silicone commercial (SmoothOn Ecoflex) a été identifié comme un bon candidat pour réaliser des expériences de laboratoire relativement simples. En collaboration avec des experts locaux (Claire Prada pour la propagation guidée et Antonin Eddi pour la mécanique des matériaux) nous avons étudié un premier exemple de guidage d'ondes élastiques dans ce milieu « mou ». Pour cela nous avons moulé des rubans et observé la propagation de vibrations dont le déplacement est exclusivement dans le plan de ce ruban. Outre les analogies intéressantes avec la topologie précédemment étudiée (existence d'un cône de Dirac) cette première expérience ouvre de nombreuses perspectives que nous allons maintenant tenter d'explorer au cours de la thèse d'Alexandre Delory. En effet, un premier axe envisagé est la reproduction en laboratoire du séisme de Mexico de 1985. Celui-ci est connu pour avoir été particulièrement ravageur, notamment à cause de vibrations qui ont duré très longtemps dans le temps. Une des hypothèses de travail consiste à dire que Mexico possède en son sous-sol une couche d'argile relativement molle, posée sur une couche granitique extrêmement dure. Nous souhaitons donc reproduire ce genre de conditions afin de voir si l'existence de modes à vitesse de groupe nulle ne serait pas à l'origine de la longue coda de ce séisme. En étudiant précisément les distributions de champ on serait alors à même d'imaginer les meilleurs

résonateurs possibles (voire la meilleure forêt) pour ce type de sous-sols. Un deuxième axe majeur qui découle directement de la collaboration de l'ANR Metaforet est l'étude de l'onde cochléaire. En effet, la transduction sonore chez les mammifères s'opère au sein de l'oreille interne par des cellules ciliées, de petits résonateurs qui sont disposés le long de la cochlée. A l'instar des arbres pour l'onde de Rayleigh, nous imaginons qu'ils modifient la propagation sonore au sein de la cochlée et ainsi jouent un rôle majeur dans la mécanique de l'audition. La reproduction en laboratoire de cette onde cochléaire sera sans nul doute une tâche des prochaines années et des nombreux liens avec les observations faites lors de cette ANR sont attendus.

A ISTerre (Grenoble), nous avons poursuivi les premières expériences en laboratoire (2013) sur la diffusion d'une onde élastique à l'intérieur d'un métamatériau bidimensionnel constitué d'une collection de longues tiges métalliques verticales collées à une plaque mince. Nous avons démontré que des états localisés apparaissent en raison d'interactions multi-ondes au niveau de la fixation de la plaque et des tiges. Ces tiges agissent comme des résonateurs couplés à la fois pour les ondes de compression et de flexion sur la métasurface. Si on se place à l'intérieur de la bande interdite principale provoquée par la résonance de compression des tiges, la densité modale du système chute près d'une résonance de flexion des tiges, et bloque le processus de diffusion du champ d'ondes. Cette expérience met physiquement en évidence le couplage de type « tight bending » dans le régime localisé pour ce métamatériau bidimensionnel.

Par ailleurs, nous avons effectué une comparaison expérimentale entre deux métasurfaces sub-longueur d'onde constituées de deux ensembles de tiges d'aluminium allongés (résonateurs) étroitement positionnés qui sont collés sur une plaque d'aluminium mince avec des organisations spatiales qui fournissent des structures aléatoires ou régulières. Les conséquences de ces arrangements spatiaux sont caractérisées par les courbes de dispersion, l'anisotropie et les propriétés de diffusion des deux métasurfaces. Nous confirmons une bande interdite large bande de type Fano (diffusion monopolaire), une bande interdite induite par Bragg, et une bande interdite étroite (diffusion dipolaire), pilotée par la réponse multimodale des résonateurs. En comparant ces résultats expérimentaux à des simulations numériques, les effets de résonance en compression des tiges sont correctement modélisés avec la bande interdite de type Fano pour les métasurfaces aléatoires et régulières, et la bande interdite de Bragg pour le réseau régulier uniquement. Les effets de résonance de flexion, cependant, montrent moins d'accord entre les expériences et les simulations, ce que nous attribuons à la construction du métamatériau. Enfin, nous illustrons un faible effet de localisation avec une mesure moyennée de l'intensité à l'emplacement de la source, éclairant les différents régimes de diffusion en jeu entre deux métasurfaces mésoscopiques aléatoires et régulières.

WP3 - Simulations numériques (leader Imperial College, Londres) : Propagation des ondes élastiques en 2D et 3D pour les métamatériaux localement résonnants en géophysique.

Dans la science des métamatériaux, la résonance locale et l'hybridation sont des phénomènes clés qui influencent fortement les propriétés de dispersion influençant fortement les propriétés de dispersion ; la métasurface discutée dans le projet METAFORÉT créée par une grappe de résonateurs couplés, des tiges sub-longueur d'onde, au sommet d'une surface élastique étant un exemple de ces caractéristiques.

Sur cette métasurface, les bandes interdites, les ondes lentes ou rapides, la réfraction négative et l'anisotropie dynamique peuvent être observées par des simulations numériques en explorant les fréquences et les nombres d'onde de la courbe de Floquet et en utilisant la zone de Brillouin. Ces caractéristiques, lorsqu'elles sont bien étudiées, peuvent être utilisées pour concevoir et contrôler la propagation des ondes élastiques le long de la métasurface.

Pour l'exemple de « plaque mince + tiges » que nous avons considéré tout au long du projet METAFORÉ, deux paramètres sont faciles à régler : la hauteur de la tige et la périodicité de la grappe. La hauteur est directement liée à la fréquence de la bande interdite et, par conséquent, aux ondes lentes et rapides, tandis que la périodicité est liée à l'apparition de l'anisotropie dynamique. En jouant avec ces deux paramètres via des simulations numériques, on conçoit tout un ensemble de métasurfaces permettant de contrôler la propagation des ondes de flexion dans les plaques minces et/ou des ondes de Rayleigh de surface dans les demi-espaces géophysiques. L'invariance d'échelle par rapport à la fréquence et à la longueur d'onde des lois physiques qui régissent le phénomène permet l'application de ces concepts dans des domaines très différents et sur une large gamme d'échelles de longueur.

Sur la base de simulations numériques, nous avons aussi démontré la possibilité de modéliser un dispositif capable de filtrer et de guider les ondes de Lamb à basse fréquence dans une plaque mince en utilisant le chevauchement modal des résonances de flexion et de compression de tiges métalliques verticales jouant le rôle de résonateurs couplés. La position en fréquence de la résonance de flexion où la fuite est observée peut être ajustée en agissant sur le diamètre d'une ligne de tiges, ce qui n'affecte pas la résonance longitudinale qui contrôle la bande interdite principale. Sur la base de ces résultats, nous avons modélisé un multiplexeur d'ondes mécaniques qui peut sélectionner le mode Lamb de flexion à fréquence étroite à l'intérieur d'une bande interdite à fréquence large.

Avec la combinaison de deux modes de diffusion, l'un monopolaire et l'autre dipolaire, le matériau effectif résultant a un indice de réfraction négatif avec une évolution rapide de la polarisation des ondes en fonction de la fréquence. Les effets du caractère aléatoire de la position des faisceaux sur l'efficacité du guide d'ondes fut également évalués, et confirment la prédominance d'un mécanisme de diffusion de Bragg de l'intensité pour la résonance de flexion des tiges, en plus des contraintes mécaniques à la fixation des tiges dues à la résonance de compression à l'intérieur de la bande interdite principale. Ces résultats mettent en évidence la forte interaction entre l'hybridation due à la résonance locale, l'hybridation entre différents modes de résonance, et la diffusion de Bragg par rapport à la diffusion incohérente. Nous pensons que ces résultats peuvent être adaptés à tout système à résonance locale si les résonateurs individuels ont un chevauchement dans leurs résonances de Fano.

WP4 - Approche théorique (leader Institut Fresnel, Marseille) : indice de réfraction effectif anisotrope hétérogène pour les ondes sismiques de surface à l'intérieur d'une collection dense de résonateurs verticaux (forêt d'arbres).

Par ailleurs, l'Institut Fresnel a principalement collaboré avec ISTERRE et Londres sur les diagrammes de dispersion pour les ondes de Rayleigh dans les forêts d'arbres. Des travaux ont été initiés entre l'Institut Fresnel et ISTERRE sur le design d'une cape d'invisibilité qui

s'appuie sur une transformation géométrique non linéaire (contrairement à celle du physicien John Pendry utilisée par de nombreux groupes) qui se prête mieux à l'approche de type homogénéisation pour réaliser les paramètres requis dans la cape.

Sébastien Guenneau à l'Institut Fresnel a continué à travailler sur le concept d'un manteau sismique avec des anneaux concentriques d'arbres avec différentes hauteurs/espaces depuis décembre 2016. Ces travaux théoriques et numériques qui visent à proposer le premier design de cape sismique se sont poursuivis dans le cadre de la thèse de Lucas Pomot (Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Marseille) en partenariat avec Grenoble, Londres et Marseille.

Suite à quelques notes sur l'équation de Kirchhoff-Love transformée de Lucas Pomot et Sébastien Guenneau, qui ont été combinées avec une formule de milieu efficace pour les arbres sur le sol par Earl Williams et Philippe Roux, quelques calculs COMSOL préliminaires ont été réalisés par Martin Lott à Grenoble qui n'ont pas donné l'efficacité d'occultation attendue.

Cependant, une nouvelle théorie pour l'équation de plaque de Kirchhoff-Love transformée développée par Lucas Pomot permettrait d'améliorer le phénomène d'occultation. Il convient de noter que cette approche de la conception d'un bouclier sismique utilisant une forêt d'arbres fait l'hypothèse que le contrôle des ondes de Rayleigh se propageant sur un substrat peut être réalisé d'une manière similaire au contrôle des ondes de Lamb dans une plaque élastique mince, et cette conjecture devra être vérifiée par des simulations numériques.

Sébastien Guenneau poursuit l'analyse théorique de ce type d'occultation dans des plaques élastiques minces avec des mathématiciens appliqués de l'Imperial College London depuis qu'il a rejoint cette institution en octobre 2019 (dans le cadre d'une affectation dans l'Unité Mixte Internationale Abraham de Moivre).

Par ailleurs, une collaboration entre ISTerre à Grenoble, le Los Alamos National Laboratory (LANL) aux Etats-Unis et le Laboratoire de Mécanique et Acoustique et l'Institut Fresnel à Marseille a permis la réalisation de nouvelles expériences réalisées par Lucas Pomot au LANL, dans le cadre de sa thèse et du projet METAFORET.

Dans ces expériences, qui ont été discutées lors d'une visite de recherche de Lucas Pomot à ISTerre début avril 2019, des ondes de Rayleigh se propagent dans un réseau doublement périodique d'arbres métalliques collés à une roche. L'effet observé, qui doit être confirmé par une analyse théorique et numérique plus poussée, est une atténuation remarquable des ondes de Rayleigh, sans réflexion, sur un spectre de fréquences relativement large. Cette expérience peut être considérée comme une sorte de contrepartie élastique aux absorbeurs optiques parfaits (trous noirs optiques), mais l'origine du phénomène observé doit être plus étudiée avant qu'un lien clair avec la physique des métamatériaux soit établi.

C.5 EXPLOITATION DES RESULTATS

Les dispositifs basés sur l'exploitation des phénomènes de bande interdite, comme les boucliers sismiques utilisant les idées de la diffusion de Bragg ou les bandes d'arrêt à fréquence nulle, gagnent en popularité.

À cette grande échelle, une analogie importante peut exister entre le métamatériau dont il est question ici dans le projet METAFORÉ et les grappes d'immeubles de grande hauteur dans les zones urbaines. Pendant un tremblement de terre, les effets combinés des interactions bâtiment-sol et des effets site-ville peuvent conduire à ce que les bâtiments agissent comme des résonateurs locaux modifiant spatialement la distribution de l'intensité du mouvement du sol. Compte tenu de la nuisance des vibrations du sol et de l'importance du contrôle des ondes élastiques pour l'environnement urbain, il s'agira d'un domaine d'importance croissante ; les degrés de liberté supplémentaires, le contrôle du comportement sous-longueur d'onde et les caractéristiques à large bande qui peuvent être utilisés en utilisant les structures résonantes sous-longueur d'onde discutées ici en font des alternatives très attrayantes.

À plus petite échelle, on s'oriente vers la manipulation d'ondes mécaniques dans des structures vibrantes. Là encore, ce sont les ondes longues et les ondes de basse fréquence que l'on souhaite souvent contrôler et, là encore, ce sont précisément les ondes qui sont visées par les dispositifs de réseaux de résonateurs sub-longueur d'onde. La capacité de séparer spatialement les ondes par fréquence, l'amélioration du champ et le potentiel de conversion de mode des ondes de surface en ondes de masse sont tous des phénomènes d'importance pratique. De même, la capacité de contrôler les ondes de surface pour créer des concentrateurs et des lentilles de surface, et la capacité de rediriger les ondes, en utilisant des réseaux de sous-longueurs d'onde sont des exemples puissants dont on peut s'inspirer pour les dispositifs. Les caractéristiques combinées d'une bande plate et d'un changement de courbure près du point d'inflexion signifient que nous sommes en mesure d'obtenir des paramètres efficaces avec des valeurs propres de signe opposé présentant des valeurs absolues très différentes. On peut donc imaginer contrôler des ondes de Rayleigh qui subiraient simultanément une réfraction positive et négative à l'échelle sub-longueur d'onde, ce qui pourrait conduire à des dispositifs d'occultation analogues aux capots hyperboliques en électromagnétique (Kim et al., 2015).

À l'échelle de la géophysique, les applications des barrières de protection hyperboliques pour les ondes de Rayleigh concernent la protection sismique. Il a également été suggéré que l'on peut obtenir des effets de trou noir dans les métamatériaux hyperboliques, ce qui aurait des applications intéressantes dans la récolte d'énergie pour les ondes de Rayleigh se propageant à travers des réseaux de tiges à des fréquences critiques. Quelle que soit l'application, ces concepts de contrôle avancés exploitant les ondes lentes seront mieux étudiés en tenant également compte des pertes et de la non-linéarité de la propagation.

Compte tenu de la jeunesse relative des métamatériaux, en tant que domaine, et de la transposition très récente des concepts de métamatériaux aux plaques élastiques et aux milieux massifs élastiques, il existe sans aucun doute de nombreux phénomènes qui seront transposés du domaine plus mature des métamatériaux optiques. Les métasurfaces sont devenues populaires en optique car elles peuvent être créées pour combiner la vision de la manipulation des ondes sub-longueur d'onde, avec les avantages de conception, de fabrication et de taille associés à l'excitation de surface. Ces concepts puissants, et le degré de contrôle disponible, font progresser l'optique vers des lentilles et des dispositifs optiques plats ; les analogues élastiques de ces métasurfaces optiques sont ceux que nous décrivons ici dans le projet METAFORÉ et nous anticipons des progrès similaires dans la conception de dispositifs mécaniques.

C.6 DISCUSSION

Le projet METAFORÉ va se poursuivre dans les prochaines années sous la forme d'une proposition ANR PRCI franco-allemande soumise en 2021 : le projet META-WT.

Le projet META-WT est construit sur une expérience sismique de 3 semaines en Allemagne avec un réseau sismique dense de ~400 géophones à trois composantes qui couvrira (1) un parc éolien de 2,5 km x 2,5 km avec presque 200 éoliennes (WTs) et (2) une ligne radiale de ~20 km de long du centre du parc éolien vers le nord avec un géophone tous les ~0,75 km. De nouvelles technologies de détection (câble à fibre optique (DAS), capteurs de rotation et vibromètre Lidar) seront utilisées comme éléments complémentaires pour obtenir (3) des informations spatiales hautement résolues du champ d'ondes sismiques et (4) l'analyse modale pour chaque WT ainsi que (5) des informations locales sur le champ d'ondes à 6 composantes (rotation + déplacement) au pied de certaines WT.

L'objectif est de mesurer la signature spatio-temporelle complète du champ d'ondes sismiques du parc éolien à partir d'enregistrements continus du bruit ambiant. Grâce à la distance dense entre les stations obtenues par la combinaison du réseau de géophones et du déploiement du câble à fibre optique, l'expérience permet d'analyser à la fois les caractéristiques du champ d'ondes à petite échelle et le schéma de rayonnement à plus longue distance du parc éolien.

Les parcs éoliens peuvent agir comme des structures actives et passives pour les ondes sismiques. Nous visons donc à étudier : (1) le champ d'ondes sismiques diffusé par les multiples WTs sous excitation continue du bruit ambiant (~1 Hz); (2) les vibrations auto-générées de l'ensemble des WTs transmises au sol sous forme de bruit sismique (0,5-10 Hz). Lorsque plusieurs résonateurs mécaniques sont couplés les uns aux autres à une échelle inférieure à la longueur d'onde, leur vibration combinée produit un effet global à grande échelle - ce qu'on appelle la physique des métamatériaux.

Contrairement aux approches classiques des métamatériaux sismiques qui visent à concevoir un ensemble de résonateurs couplés ressort-masse pour annuler les ondes sismiques, nous étudions ici le rôle des WTs elles-mêmes comme ensemble de résonateurs couplés qui créeraient une méta-surface avec des propriétés physiques particulières. L'une des conséquences du champ d'éoliennes décrit comme un métamatériau sismique est la mesure de courbes de dispersion anormales et de bandes interdites pour les ondes de surface, c'est-à-dire des fréquences pour lesquelles aucune propagation d'onde n'est possible.

La mesure du champ d'ondes sismiques le long d'une ligne radiale de ~20 km de long ajoutera des contraintes sur le champ d'ondes basse fréquence incident ainsi que sur le modèle de rayonnement de l'ensemble des WTs et la corrélation de ce modèle spatial avec le vent à une échelle intermédiaire. Les mesures seront comparées à des simulations numériques 3D, qui permettront de prédire le champ d'ondes sismiques en champ lointain. En superposant le champ d'ondes sismiques émis par chaque WT, nous obtiendrons des modèles d'interférences constructives ou destructives, en particulier autour des résonances de ces structures. De plus, chaque WT sera balayé par un vibromètre Lidar pour étudier localement les vibrations des WT (résonances de torsion, de flexion ou de compression). Le système DAS et plusieurs

capteurs de rotation permettront de quantifier le rayonnement des vibrations des WT dans le sol en champ proche. Enfin, les données météorologiques seront fournies par les propriétaires des parcs éoliens.

L'expérience proposée dans le projet META-WT sera la toute première sur la physique des métamatériaux appliquée à une plus grande échelle spatiale en sismologie, après le succès d'une expérience similaire à l'échelle du mètre dans le cadre du projet METAFORÉ. Notre approche complétera les projets de recherche récemment entrepris qui visent à atténuer les effets perturbateurs des éoliennes sur les stations sismiques.

C.7 CONCLUSIONS

Les résultats du projet METAFORÉ ne se limitent pas à l'idée - aussi belle soit-elle - qu'un phénomène physique aussi complexe que la physique des métamatériaux puisse trouver une démonstration spectaculaire à l'échelle humaine avec un objet aussi naturel et aussi commun qu'une forêt d'arbres. Une telle expérience multidisciplinaire qui combine la physique et la géophysique et qui couvre des échelles allant du micromètre au kilomètre a eu un fort impact médiatique tant dans la communauté scientifique qu'auprès du grand public.

Tout d'abord, la chaîne de télévision franco-allemande ARTE a proposé deux documentaires sur la préparation et la gestion de l'expérience sismique dans la forêt des arbres. La chaîne française a proposé un documentaire dans l'émission Xenius/ARTE alors que la chaîne allemande était intéressée par une version plus longue pour l'émission "Quarks & Co". À noter que le journaliste américain Phil Mc Kenna a reçu une bourse de l'EGU pour préparer un rapport sur notre expérience en forêt.

Enfin, en termes de sensibilisation et d'éducation du public, nous pouvons maintenant concevoir une expérience à plus petite échelle sur un disque mince de béton de 10 m de diamètre (largeur, 10 cm) dans lequel une "forêt" dense de barres métalliques verticales (longueur, 3 à 5 m) serait attachée comme une représentation d'une collection de bâtiments dans une ville. Des capteurs sismiques miniaturisés permanents (capteurs mécaniques MEMs avec technologie sans fil) peuvent alors être utilisés pour mesurer en temps réel le bruit ambiant sur le béton à l'intérieur et à l'extérieur des résonateurs, et démontrer les bandes passantes de fréquence au centre du métamatériau. Un tel projet est facile à concevoir et d'un coût raisonnable.

Nous pensons également que ce projet débouchera dans le futur sur de solides applications physiques et géophysiques, dont, par exemple :

- 1- Les bandes de fréquences interdites, ou "bandes interdites", peuvent être exploitées pour annuler le bruit sismique ambiant dans des endroits où les vibrations du sol sont un problème, comme pour des mesures scientifiques très sensibles (par exemple, la vibration locale d'une grande lentille astronomique).

2- De même, la focalisation sub-longueur d'onde qui résulte d'une courbe de dispersion anormale à l'intérieur d'un métamatériau peut être exploitée pour concevoir des lentilles ou des guides d'ondes permettant de contrôler et de manipuler localement les ondes sismiques.

3- Une forêt sera le premier milieu à grande échelle où la physique des métamatériaux aura été démontrée. Cependant, nous pouvons envisager des études futures à une échelle encore plus grande ; par exemple, certaines villes modernes peuvent être considérées comme un ensemble de grands bâtiments qui peuvent certainement se comporter comme des résonateurs pour les ondes sismiques de basse fréquence (entre 1 et 5 Hz). Après notre démonstration expérimentale avec une forêt à l'échelle géophysique, la prochaine question sera : "Une ville se comporte-t-elle comme un métamatériau pour les ondes sismiques ?".

Il est raisonnable d'imaginer que le couplage global des ondes sismiques à l'échelle urbaine peut être caractérisé comme un métamatériau géophysique géant, où un groupe de résonateurs sub-longueur d'onde (c'est-à-dire des bâtiments) donne lieu à un nouveau type de physique de propagation des ondes. Le couplage sol-structure à l'échelle urbaine a été détecté à Mexico City après le tremblement de terre de Michoacan en 1985, le mouvement sismique du sol du centre-ville montrant des battements monochromatiques de longue durée en raison de la résonance des bâtiments. Dans le prolongement naturel du projet META-FORET, des expérimentations à l'échelle urbaine dirigées par P. Gueguen à ISTERRE sont prévues à Quito (Équateur), avec le déploiement d'un réseau urbain 3D de taille moyenne (40 sismomètres) à l'intérieur des bâtiments et au niveau du sol.

Comme les métamatériaux sont conçus pour permettre un contrôle total de la propagation des ondes dans des plages de fréquences désignées, il pourrait être possible, dans les dix ou vingt prochaines années, de définir un métamatériau urbain basé sur le schéma d'urbanisation afin de produire des effets bénéfiques sur la réponse des structures et les victimes de séismes.

C.8 REFERENCES

- Achaoui, Y., Laude, V., Benchabane, S. & Khelif, A. "Local resonances in phononic crystals and in random arrangements of pillars on a surface", *J. Appl. Phys.* 114, (2013).
- Aki, K. & Richards, P. G. *Quantitative Seismology, Theory and Methods*, vol. I and II (W. H. Freeman, 1980).
- M. Assouar, M. Senesi, M. Oudich, M. Ruzzene and Z. Hou, "Broadband plate-type acoustic metamaterial for low-frequency sound attenuation », *Phys. Rev. Lett.*, vol. 101, no. 17, 173505, 2012.
- P. A. Belov, Y. Hao, and S. Sudhakaran, "Subwavelength microwave imaging using an array of parallel conducting wires as a lens", *Phys. Rev. B* 73, 033108 (2006).
- S. Benchabane, A. Khelif, J.-Y. Rauch, L. Robert and V. Laude, "Evidence for complete surface wave band gap in a piezoelectric phononic crystal", *Phys. Rev. E*, vol. 73, p. 065601, 2006.
- P. Berthelot, B. Pezot and Ph. Liausu, "Improvement of soils by semi-rigid columns : the CMC technique », XIII CMSGE, Prague, 2003.
- F. Brenguier, P. Kowalski, N. Nakata, P. Boué, N. Ackerley, M. Campillo, E. Larose, S. Rambaud, C. Pequegnat, T. Lecocq, P. Roux, V. Ferrazzini, N. Villeneuve, N. M. Shapiro, J. Chaput, "Towards 4-D noise-based seismic probing of volcanoes: Perspectives from a Large-

- N experiment on Piton de la Fournaise Volcano”, *Seismological Research Letters* 87 (1), 15-25, 2016.
- Brûlé, S., Javelaud, E. H., Enoch, S., and Guenneau, S. (2014). “Experiments on seismic metamaterials: Molding surface waves,” *Phys. Rev. Lett.* 112, 133901.
 - Brun, M., Guenneau, S., and Movchan, A. B. (2009). “Achieving control of in-plane elastic waves,” *Appl. Phys. Lett.* 94(6), 061903.
 - Buckmann, T., Thiel, M., Kadic, M., Schittny, R., and Wegener, M. (2014). “An elasto-mechanical unfeelability cloak made of pentamode metamaterials”, *Nat. Commun.* 5, 4130.
 - L. A. Bunimovich, “On the ergodic properties of nowhere dispersing billiards” *Comm. Math. Phys.*, vol. 3, p. 295, 1979.
 - J. Capon, “Signal processing and frequency-wavenumber spectrum analysis for a large aperture seismic array,” *Methods in Computational Physics* (Elsevier, 1973), Vol. 13, pp. 1–59.
 - Chen, H., Chan, C., and Sheng, P. (2010). “Transformation optics and metamaterials”, *Nat. Mater.* 9, 387–396.
 - Y. Cheng, F. Yang, J. Y. Xu, and X. J. Liu, “A multilayer structured acoustic cloak with homogeneous isotropic materials”, *Appl. Phys. Lett.* 92, 151913 (2008).
 - Choi, M. S. H. Lee, Y. Kim, S. B. Kang, J. Shin, M. H. Kwak, K. Y. Kang, Y. H. Lee, N. Park and B. Min, “A terahertz metamaterial with unnaturally high refractive index”, *Nature* 470, 369–373 (2011).
 - Chopra, A. K. *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995. 4th edition.
 - J. Christensen and F. J. G. de Abajo, “Anisotropic Metamaterials for Full Control of Acoustic Waves”, *Phys. Rev. Lett.* , vol. 108(12), p. 124301, 2012.
 - Climente, A., Torrent, D., and Sanchez-Dehesa, J. (2014). “Gradient index lenses for flexural waves based on thickness variations,” *Appl. Phys. Lett.* 105, 064101.
 - A. Colombi, P. Roux, and M. Rupin, (2014a). “Sub-wavelength energy trapping of elastic waves in a metamaterial”, *J. Acoust. Soc. Am.* 136, EL192.
 - Colombi, A., Boschi, L., Roux, P., and Campillo, M. (2014b). “Green’s function retrieval through crosscorrelations in a two-dimensional complex reverberating medium,” *J. Acoust. Soc. Am.* 135(3), 1034–1043.
 - Colombi, A., Roux, P., Guenneau, S. & Rupin, M. (2015). “Directional cloaking of flexural waves in a plate with a locally resonant metamaterial”, *J. Acoust. Soc. Am.* 137, 1783–9.
 - A Colombi, S Guenneau, P Roux, R.V. Craster, “Transformation seismology: composite soil lenses for steering surface elastic Rayleigh waves”, *arXiv preprint arXiv:1512.06450*.
 - Cowan, M. L., Page, J. H. & Sheng, P. “Ultrasonic wave transport in a system of disordered resonant scatterers: Propagating resonant modes and hybridization gaps”. *Phys. Rev. B* 84 (2011).
 - Craster, R.V., and Guenneau, S. (2012). *Acoustic Metamaterials: Negative Refraction, Imaging, Lensing and Cloaking* (Springer, London), 323 pp.
 - Danjon F., Sinoquet H. Godin C., Colin F. and Drexhage M. (1999a), “Characterisation of structural tree root architecture usind 3D digitizing and AMAPmod software”, *Plant soil* 2011-241-258.
 - Danjon F, Bert D, Godin C and Trichet P. (1999b) “Structural root architecture of 5-year old *Pinus pinaster* measured by 3D digitising and analysed with AMAPmod”, *Plant Soil* 217, 49-63.
 - Danjon F., Fourcaud T., Bert D. (2005) “Root architecture and wind-firmness of mature *Pinus pinaster*”, *New Phytol.* 168:387-400

- Danjon F., H. Khuder and A. Stokes, (2013) "Deep Phenotyping of Coarse Root Architecture in *R. pseudoacacia* Reveals That Tree Root System Plasticity Is Confined within Its Architectural Model", PLoS ONE 8(12):e83548.
- P. A. Deymier, "Acoustic Metamaterials and Phononic Crystals", Vol. 173 (Springer, New York, 2013).
- A. Diatta, S. Guenneau, (2014). "Controlling solid elastic waves with spherical cloaks", Applied Physics Letters 105 (2), 021901.
- C. Draeger and M. Fink, (1997). "One-Channel Time Reversal of Elastic Waves in a Chaotic 2D-Silicon Cavity", Phys. Rev. Lett. 79(3), 407–410.
- M. Dubois, M. Farhat, E. Bossy, S. Enoch, S. Guenneau and P. Sebbah, "Flat lens for pulse focusing of elastic waves in thin plates", Appl. Phys. Lett., vol. 103(7), p. 071915, 2013.
- N. Engheta and R. W. Ziolkowski, Metamaterials: Physics and Engineering Explorations (John Wiley & Sons, New York, 2006).
- Ewins, D. J. Modal Testing: Theory, Practice and Application (Research Studies Press, Baldock, UK, 2000), 2nd edition.
- Fan, S., Villeneuve, P. R., Joannopoulos, J. D. and Haus, H. A. (1998). "Channel Drop Tunneling through Localized States". Phys. Rev. Lett. 80, 960–963.
- Fang, N. (2005). "Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens". Science 308, 534–537.
- N. Fang, D. Xi, J. Xu, M. Ambati, W. Srituravanich, C. Sun and X. Zhang, 2006. "Ultrasonic metamaterials with negative modulus", Nature Mater vol. 5, p. 452–456.
- Fano, U. "Effects of configuration interaction on intensities and phase shifts". Phys. Rev. 124, 1866–1878 (1961).
- Farhat, M., Enoch, S., Guenneau, S., and Movchan, A. B. (2008). "Broadband cylindrical acoustic cloak for linear surface waves in a fluid." Phys. Rev. Lett. 101, 134501.
- Farhat, M., Guenneau, S., and Enoch, S. (2009). "Ultrabroadband elastic cloaking in thin plates," Phys. Rev. Lett. 103, 024301.
- M. Farhat, S. Guenneau, S. Enoch, A. B. Movchan and G. G. Petursson, (2010). "Focusing bending waves via negative refraction in perforated thin plates", Appl. Phys. Lett., vol. 96, p. 081909.
- M. Fink, (1997). "Time Reversed Acoustics", Phys. Today 50(3), 34.
- T. Gallot, S. Catheline, P. Roux, and M. Campillo, (2012). "A passive inverse filter for Green's function retrieval", J. Acoust. Soc. Am. 131, EL21.
- K. E. Gilbert, (1983) "A propagator matrix method for periodically stratified media", J. Acoust. Soc. Am. 73, 137.
- R. Gracia-Salgado, D. Torrent, and J. Sanchez-Dehesa, (2012). "Quasi two-dimensional acoustic metamaterials with negative bulk modulus", New J. Phys. 14, 103052.
- Green D. W., Winandy, J.E. and Kretschmann, D.E. (1999). Mechanical properties of wood. General technical report FPL GTR-113, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory.
- S. Guenneau, A. Movchan, G. Pétursson, S.A. Ramakrishna, (2007). "Acoustic metamaterials for sound focusing and confinement", New Journal of Physics 9 (11), 399.
- Guenneau, S., McPhedran, R., Enoch, S., Movchan, A., Farhat, M., and Nicorovici, N.-A. P. (2011). "The colors of cloaks," J. Optics 13, 024014.
- M. C. Gutzwiller, Chaos in Classical and Quantum Mechanics, New York: Springer-Verlag, 1990.
- J.-C. Hsu, (2013). "Effects of elastic anisotropy in phononic band-gap plates with two-dimensional lattices", Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 46, no. 1, p. 015301.

- C. Inserra, V. Tournat and V. Gusev, (2007). "A method of controlling wave propagation in initially spatially periodic media", *Europhys. Lett.*, vol. 78(4), p. 44001.
- Ishikawa, A., Zhang, S., Genov, D. A., Bartal, G., and Zhang, X. (2009). "Deep subwavelength terahertz waveguides using gap magnetic plasmon," *Phys. Rev. Lett.* 102, 043904.
- O. Jenck, D. Dias and R. Kastner, (2005), "Soft ground improvement by vertical rigid piles : Two-dimensional physical modelling and comparison with current design methods", *Soils and Foundations* 45 (6), 15-30.
- Jing, X., Sheng, P. & Zhou, M. "Acoustic and electromagnetic quasi-modes in dispersed random media". *Phys. Rev. A* 46, 6513–6534 (1992).
- J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn, and R. D. Meade, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light* (Princeton University Press, Princeton, NJ, 2011).
- Kadic, M., Buckmann, T., Schittny, T., and Wegener, M. (2013). "Metamaterials beyond electromagnetism," *Rep. Prog. Phys.* 76, 126501.
- Kafesaki, M., Sigalas, M. M., and Economou, E. N. (1995). "Elastic wave band gaps in 3-D periodic polymer matrix composites," *Solid State Commun.* 96(5), 285–289.
- Kaina, N., Fink, M., and Lerosey, G. (2013a). "Composite media mixing Bragg and local resonances for highly attenuating and broad bandgaps," *Sci. Rep.* 3, 3240.
- Kaina, N., Lemoult, F., Fink, M., and Lerosey, G. (2013b). "Ultrasmall mode volume defect cavities in spatially ordered and disordered metamaterials," *Appl. Phys. Lett.* 102(14), 144104.
- N. Kaina, F. Lemoult, M. Fink and G. Lerosey (2015). "Negative refractive index and acoustic superlens from multiple scattering in single negative metamaterials", *Nature* 525, 77–81.
- A. Khelif, A. Choujaa, B. Djafari-Rouhani, M. Wilm, S. Ballandras and V. Laude, "Trapping and guiding of acoustic waves by defect modes in a full-band-gap ultrasonic crystal", *Phys. Rev. B*, vol. 68(21), p. 214301, 2003.
- Khelif, A., Choujaa, A., Benchabane, S., Djafari-Rouhani, B., and Laude, V. (2004). "Guiding and bending of acoustic waves in highly confined phononic crystal waveguides," *Appl. Phys. Lett.* 84(22), 4400–4402.
- Khelif, A., Djafari-Rouhani, B., Vasseur, J. O., and Deymier, P. A. (2003). "Transmission and dispersion relations of perfect and defect-containing waveguide structures in phononic band gap materials," *Phys. Rev.* 68, 024302.
- A. Khelif, Y. Achaoui, S. Benchabane, V. Laude and B. Aoubiza, "Locally resonant surface acoustic wave band gaps in a two-dimensional phononic crystal of pillars on a surface", *Phys. Rev. B*, vol. 81, p. 214303, 2010.
- Khelif, A., Achaoui, Y. & Aoubiza, B. "Surface acoustic waves in pillars-based two-dimensional phononic structures with different lattice symmetries". *J. Appl. Phys.* 112, (2012).
- C. Kittel and P. McEuen, *Introduction to Solid State Physics*, Vol. 8 (Wiley, New York, 1976).
- Komatitsch, D. & Vilotte, J.-P. "The spectral element method: An efficient tool to simulate the seismic response of 2d and 3d geological structures". *Bull. Seism. Soc. Am.* 88, 368–392 (1998).
- Komatitsch, D. & Martin, R. "An unsplit convolutional perfectly matched layer improved at grazing incidence for the seismic wave equation". *Geophysics* 72, SM155–SM167 (2007).
- T. Koschny, M. Kafesaki, E. N. Economou, and C. M. Soukoulis, "Effective Medium Theory of Left-Handed Materials", *Phys. Rev. Lett.* 93, 107402 (2004).
- Kroedel, S., Thome, N., and Daraio, C. (2015). "Wide band-gap seismic metastructures", *Extreme Mechanics Letters*, 4, 111-117.

- Ktorza, L. Ceresoli, S. Enoch, S. Guenneau, R. Abdeddaim, (2015). "Single frequency microwave cloaking and subwavelength imaging with curved wired media", *Optics Express* 23 (8), 10319-10326.
- Legendijk, A. Vibrational relaxation studied with light. In Bron, W. (ed.) *Ultrashort Processes in Condensed Matter*, vol. 314 of NATO ASI Series, 197–236 (Springer US, 1993).
- H. Lamb, "On Group – Velocity", *Proc. London Math. Soc.*, vol. 1, p. 473, 1904.
- C. Lagarrigue, J.-P. Groby, and V. Tournat, "Sustainable sonic crystal made of resonating bamboo rods", *J. Acoust. Soc. Am.* 133, 247 (2013).
- Lemoult, F., Lerosey, G., de Rosny, J., and Fink, M. (2010). "Resonant metalenses for breaking the diffraction barrier," *Phys. Rev. Lett.* 104, 203901.
- F. Lemoult, M. Fink, and G. Lerosey, "Acoustic resonators for far-field control of sound on a subwavelength scale", *Phys. Rev. Lett.* 107, 064301 (2011a).
- F. Lemoult, M. Fink, and G. Lerosey, "Revisiting the wire medium: An ideal resonant metalens", *Waves Random Complex Media* 21, 591 (2011b).
- F. Lemoult, N. Kaina, M. Fink, and G. Lerosey, "Wave propagation control at the deep subwavelength scale in metamaterials", *Nature Phys.* 9, 55-60 (2013).
- U. Leonhardt, "Optical conformal mapping", *Science* 312, 1777 (2006).
- G. Lerosey, J. De Rosny, A. Tourin, and M. Fink, "Focusing beyond the diffraction limit with far-field time reversal", *Science* 315, 1120 (2007).
- V. Leroy, A. Strybulevych, M. Scanlon and J. H. Page, "Transmission of ultrasound through a single layer of bubbles", *European Physics Journal E*, vol. 29, pp. 123-130, 2009.
- J. Li and C. T. Chan, "Double-negative acoustic metamaterial", *Phys. Rev. E*, vol. 70(5), p. 055602, 2004.
- Li, D., Zigoneanu, L., Popa, B.-I., and Cummer, S. A. (2012). "Design of an acoustic metamaterial lens using genetic algorithms," *J. Acoust. Soc. Am.* 132(4), 2823–2833.
- Li, X., and Liu, Z. (2005). "Coupling of cavity modes and guiding modes in two-dimensional phononic crystals," *Solid State Commun.* 133(6), 397–402.
- Z. Liu, C. T. Chan, P. Sheng, A. L. Goertzen, and J. H. Page, "Elastic wave scattering by periodic structures of spherical objects: Theory and experiment", *Phys. Rev. B* 62, 2446 (2000a).
- Z. Liu, X. Zhang, Y. Mao, YY Zhu, Z. Yang, C. T. Chan, and P. Sheng, "Locally resonant sonic materials", *Science* 289, 1734 (2000b).
- McCall, S. L., Platzman, P. M., Dalichaouch, R., Smith, D., and Schultz, S. (1991). "Microwave propagation in two-dimensional dielectric lattices," *Phys. Rev. Lett.* 67, 2017–2020.
- F. Masse, S. L. Pearlman, M. G. Taube, "Controlled Modulus Columns For Support of Above-Ground Storage Tanks", *Ohio River Valley Soils Seminar XL (ORVSS)*, November 13, 2009.
- R. Martinez-Sala, J. Sancho, J. V. Sanchez, J. Linres and F. Meseguer (1995). "Sound attenuation by sculpture", *Nature*, vol. 378, p. 241.
- A. A. Maznev, O. B. Wright and O. Matsuda, (2011). "Mapping the band structure of a surface phononic crystal", *New Journal of Physics*, vol. 13(1), p. 013037.
- Meseguer, F., Holgado, M., Caballero, D., Benaches, N., Sanchez-Dehesa, J., Lopez, C. and Llinares, J., "Rayleigh-wave attenuation by a semi-infinite two-dimensional elastic-band-gap crystal". *Phys. Rev. B* 59, 12169–12172 (1999).
- Milton, G., Briane, M., and Willis, J. (2006). "On cloaking for elasticity and physical equations with a transformation invariant form," *New J. Phys.* 8(248), 014301.
- Miroshnichenko, A. E., Flach, S. & 236 Kivshar, Y. S. "Fano resonances in nanoscale structures". *Rev. Mod. Phys.* 82, 2257–2298 (2010).

- Mohammadi, S., Eftekhari, A. A., Hunt, W. D., and Adibi, A. (2009). "High-q micromechanical resonators in a two-dimensional phononic crystal slab," *Appl. Phys. Lett.* 94(5), 051906.
- Norris, A. (2008). "Acoustic cloaking theory," *Proc. R. Soc. A* 464, 2411–2434.
- Norris, A., and Shuvalov, A. (2011). "Elastic cloaking theory," *Wave Motion* 48, 525–538.
- Notomi, M. (2000). "Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals: Refractionlike behavior in the vicinity of the photonic band gap," *Phys. Rev. B* 62(16), 10696–10705.
- C. Plomteux, C. Spaulding, G. Simmons, "Reinforcement of Soft Soil by Means of Controlled Modulus Columns", *Soil and Rock, America* 2003.
- C. Plomteux, R. Ciortan, "Integrated Ground improvement solution for the largest wind farm project in Europe", *Research to Design in European Practice, Bratislava, Slovak Republic, June 2 – 4, 2010*
- M. Oudich, M. Senesi, M. Assouar, M. Ruzenne, J. Sun, B. Vincent, Z. Hou and Wu. T-T., "Experimental evidence of locally resonant sonic band gap in two-dimensional phononic stubbed plates", *Phys. Rev. B*, vol. 84, p. 165136, 2011.
- J. H. Page, A. Sukhovich, S. Yang, M. Cowan, F. V. D. Biest, A. Tourin, M. Fink, Z. Liu, C. Chan and P. Sheng, "Phononic crystals", *Phys. Stat. Sol. (b)*, vol. 241, pp. 3454–3462, 2004.
- J. H. Page, E. J. S. Lee and C. Croenne, "Anomalous ultrasonic transport in phononic crystals with overlapping Bragg and hybridization gaps", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 134, p. 4026, 2013.
- Park, J., Park, B., Kim, D., and Park, J. (2012). "Determination of effective mass density and modulus for resonant metamaterials," *J. Acoust. Soc. Am.* 132(4), 2793–2799.
- Parnell, W., and Norris, A. (2012). "Hyperelastic cloaking theory: Transformation elasticity with pre-stressed solids," *Proc. R. Soc. A* 468, 2881–2903.
- Pendry, J. B., Holden, A. J., Stewart, W. J. & Youngs, I. "Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures". *Phys. Rev. Lett.* 76, 4773–4776 (1996).
- J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 47, 2075(1999).
- Pendry, J. B. (2000). "Negative refraction makes a perfect lens," *Phys. Rev. Lett.* 85, 3966–3969.
- J. B. Pendry, D. Schurig, and D. R. Smith, "Controlling electromagnetic fields", *Science* 312, 1780 (2006).
- Peter, D., Komatitsch, D., Luo, Y., Martin, R., Le Goff, N., Casarotti, E., Le Loher, P., Magnoni, F., Liu, Q., Blitz, C., Nissen-Meyer, T., Basini, P., and Tromp, J. (2011). "Forward and adjoint simulations of seismic wave propagation on fully unstructured hexahedral meshes," *Geophys. J. Int.* 186(2), 721–739.
- Y. Pennec, B. Djafari Rouhani, H. Larabi, A. Akjouj, J. N. Gillet, J. O. Vasseur and G. Thabet, "Phonon transport and waveguiding in a phononic crystal made up of cylindrical dots on a thin homogeneous plate", *Phys. Rev. B*, vol. 80, no. 14, p. 144302, 2009.
- J. Pierre, O. Boyko, L. Belliard, J. O. Vasseur and B. Bonello, "Negative refraction of zero order flexural Lamb waves through a two-dimensional phononic crystal", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97(12), p. 121919, 2010.
- I. E. Psarobas, A. Modinos, R. Sainidou and N. Stefanou, "Acoustic properties of colloidal crystals", *Phys. Rev. B*, vol. 65, p. 064307, 2002.
- Ramakrishna, S., and Grzegorzcyk, T. (2008). *Physics and Applications of Negative Refractive Index Materials* (CRC Press, Boca Raton, FL), 440 pp.
- Rost, S. "Array seismology: Methods and applications". *Reviews of Geophysics* 40 (2002).

- D. Royer and E. Dieulesaint, *Elastic waves in solids I : free and guided propagation*, Berlin: Springer, 2000.
- M. Rupin, F. Lemoult, G. Lerosey, and P. Roux, "Experimental demonstration of ordered and disordered multiresonant metamaterials for lamb waves", *Phys. Rev. Lett.* 112, 234301 (2014a).
- M. Rupin, P. Roux, and S. Catheline, "One-channel inverse filter: spatio-temporal control of a complex wave-field from a single point", *Appl. Phys. Lett.* 104, 244101 (2014b).
- Rupin, M., Catheline, S. & Roux, P. "Super-resolution experiments on lamb waves using a single emitter", *Applied Physics Letters* 106, 24103 (2015a).
- M. Rupin, P. Roux, G. Lerosey, and F. Lemoult (2015b), "Symmetry issues in the hybridization of multi-mode waves with resonators: an example with Lamb waves metamaterial", *Scientific Reports* 5, 13714.
- R. Sainidou, N. Stefanou, and A. Modinos, "Formation of absolute frequency gaps in three-dimensional solid phononic crystals", *Phys. Rev. B* 66, 212301 (2002).
- Sanchis, L., Garcia-Chocano, V., Llopis-Pontiveros, R., Climente, A., Mart_inez-Pastor, J., Cervera, F., and Sanchez-Dehesa, J. (2013). "Three-dimensional axisymmetric cloak based on the cancellation of acoustic scattering from a sphere," *Phys. Rev. Lett.* 110, 124301.
- Scherrer, G., Hofman, M., Smigaj, W., Kadic, M., Chang, T.-M., Melique, X., Lippens, D., Vanbesien, O., Cluzel, B., de Fornel, F., Guenneau, S., and Gralak, B. (2013). "Photonic crystal carpet: Manipulating wave fronts in the near field at 1.55 μm ," *Phys. Rev. B* 88, 115110.
- Shen, Y. and Ye, D. and Celanovic, I. and Johnson, S. G. and Joannopoulos, J. D. and Soljačić, M., (2014). "Optical Broadband Angular Selectivity," *Science* 343(6178), 1499-1501.
- M. Schoenberg and P. N. Sen, "Properties of a periodically stratified acoustic half-space and its relation to a Biot fluid", *J. Acoust. Soc. Am.* 73, 61 (1983).
- Shelby, R. A., Smith, D. R., and Schultz, S. (2001). "Experimental verification of a negative index of refraction," *Science* 292(5514), 77-79.
- Shen, J. T., Catrysse, P. B., and Fan, S. (2005). "Mechanism for designing metallic metamaterials with a high index of refraction," *Phys. Rev. Lett.* 94, 197401.
- Sheng, P. "A step towards a seismic cloak". *Physics* 34 (2014).
- Sigalas, M., and Economou, E. N. (1993). "Band structure of elastic waves in two dimensional systems," *Solid State Commun.* 86(3), 141-143.
- M. M. Sigalas, M. S. Kushwaha, E. N. Economou, M. Kafesaki, I. E. Psarobas and W. Steurer, "Classical vibrational modes in phononic lattices: theory and experiment", *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials*, vol. 220, p. 765-809, 2005.
- Silveirinha, M. & Engheta, N. (2006). "Tunneling of electromagnetic energy through subwavelength channels and bends using ϵ -near-zero materials". *Physical Review Letters* 97.
- Smith, D. R., Padilla, W. J., Vier, D. C., Nemat-Nasser, S. C., and Schultz, S. (2000). "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity," *Phys. Rev. Lett.* 84, 4184-4187.
- Smith, D. R., Pendry, J. B. & Wiltshire, M. C. K. "Metamaterials and negative refractive index". *Science* 305, 788-792 (2004).
- Smith, D. R., Padilla, W. J., Vier, D. C., Nemat-Nasser, S. C. & Schultz, S. "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity". *Phys. Rev. Lett.* 84, 4184-4187 (2000).
- Stenger, N., Wilhelm, M., and Wegener, M. (2012). "Experiments on elastic cloaking in thin plates," *Phys. Rev. Lett.* 108, 014301.

- T. Still, W. Cheng, M. Retsch, R. Sainidou, J. Wang, U. Jonas, N. Stefanou, and G. Fytas, "Simultaneous Occurrence of Structure-Directed and Particle-Resonance-Induced Phononic Gaps in Colloidal Films", *Phys. Rev. Lett.* 100, 194301 (2008).
- A. Sukhovich, B. Merheb, K. Muralidharan, J. Vasseur, Y. Pennec, P. Deymier and J. Page, "Experimental and Theoretical Evidence for Subwavelength Imaging in Phononic Crystals", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 102, p. 154301, 2009.
- Sukhovich, A., Jing, L. & Page, J. H. "Negative refraction and focusing of ultrasound in two-dimensional phononic crystals". *Phys. Rev. B* 77, 014301 (2008).
- M. Tanter, J.-F. Aubry, J. Gerber, J.-L. Thomas, and M. Fink, "Optimal focusing by spatio-temporal inverse filter. I. Basic principles", *J. Acoust. Soc. Am.* 110(1), 37–47 (2001).
- D. Torrent and J. Sanchez-Dehesa, "Effective parameters of clusters of cylinders embedded in a nonviscous fluid or gas", *Phys. Rev. B* 74, 224305 (2006).
- B. Ungureanu, Y. Achaoui, S. Enoch, S. Brulé, S. Guenneau, "Auxetic-like metamaterials as novel earthquake protections », *EPJ Applied Metamaterials* 2, 17 (2016).
- J. O. Vasseur, P. A. Deymier, B. Djafari-Rouhani, Y. Pennec and A. C. Hladky-Hennion, "Absolute forbidden bands and waveguiding in two-dimensional phononic crystal plate", *Phys. Rev. B : Condens. Matter*, vol. 77 (8), p. 085415, 2008.
- Veselago, V. G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Soviet Physics Uspekhi* 10, 509 (1968).
- Wegener, M. (2013). "Metamaterials beyond optics," *Science* 342(6161), 939–940.
- Williams, E. G., Roux, P., Rupin, M. & Kuperman, W. A. "Theory of multiresonant metamaterials for A0 Lamb waves". *Physical Review B* 91, 1–12 (2015).
- Woods, R. D. "Screening of surface wave in soils". *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 94, 951–980 (1968).
- Y. Wu, Y. Lai, and Z.-Q. Zhang, "Effective medium theory for elastic metamaterials in two dimensions", *Phys. Rev. B* 76, 205313 (2007).
- T.-C. Wu, T.-T. Wu and J.-C. Hsu, "Waveguiding and frequency selection of Lamb waves in a plate with periodic stubbed surface", *Phys. Rev. B*, vol. 79, no. 10, p. 104306, 2009.
- T. T. Wu, Y. T. Chen, J. H. Sun, S. C. S. Lin and T. J. Huang, "Focusing of the lowest antisymmetric Lamb wave in a gradient-index phononic crystal plate", *App. Phys. Lett.*, vol. 98(17), p. 171911, 2011.
- Y. Xiao, J. Wen and X. Wen, "Flexural wave band gaps in locally resonant thin plates with periodically attached spring–mass resonators", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 45, no. 19, p. 195401, 2012.
- J. Xu, X. Jiang, N. Fang, E. Georget, R. Abdeddaim, J.-M. Geffrin, M. Farhat, P. Sabouroux, S. Enoch and S. Guenneau, "Molding acoustic, electromagnetic and water waves with a single cloak », *Scientific reports* 5, 10678 (2015).
- E. Yablonovitch, "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics", *Phys. Rev. Lett.* 58, 2059 (1987).
- Yang, S., Page, J. H., Liu, Z., Cowan, M. L., Chan, C. T., and Sheng, P. (2002). "Ultrasound tunneling through 3D phononic crystals," *Phys. Rev. Lett.* 88, 104301.
- M. Yang, G. Ma, Y. Wu, Z. Yang, and P. Sheng, "Homogenization scheme for acoustic metamaterials", *Phys. Rev. B* 89, 064309 (2014).
- J. Zhao, R. Marchal, B. Bonello and O. Boyko, "Efficient focalization of antisymmetric Lamb waves in gradient-index phononic crystal plates", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 101(26), p. 261905, 2012.

- J. Zhu, J. Christensen, J. Jung, L. Martin-Moreno, X. Yin, L. Fok, X. Zhang, and F. J. Garcia-Vidal, "A holey-structured metamaterial for acoustic deep-subwavelength imaging", Nature Phys. 7, 52 (2011).

D LISTE DES LIVRABLES

Quand le projet en comporte, reproduire ici le tableau des livrables fourni au début du projet. Mentionner l'ensemble des livrables, y compris les éventuels livrables abandonnés, et ceux non prévus dans la liste initiale.

| Date de livraison | N° | Titre | Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...) | Partenaires (souligner le responsable) | Commentaires |
|-------------------|----|--------------------------------|---|--|--------------|
| Avril 2018 | 1 | Rapport d'avancement à 18 mois | rapport | Roux | |
| Mai 2019 | 2 | Rapport d'avancement à 30 mois | rapport | Roux | |
| Septembre 2021 | 3 | Rapport final | rapport | Roux | |

E IMPACT DU PROJET

Ce rapport rassemble des éléments nécessaires au bilan du projet et plus globalement permettant d'apprécier l'impact du programme à différents niveaux.

E.1 INDICATEURS D'IMPACT

Nombre de publications et de communications (à détailler en E.2)

Comptabiliser séparément les actions monoparttenaires, impliquant un seul partenaire, et les actions multiparttenaires résultant d'un travail en commun.

Attention : éviter une inflation artificielle des publications, mentionner uniquement celles qui résultent directement du projet (postérieures à son démarrage, et qui citent le soutien de l'ANR et la référence du projet).

| | | Publications multiparttenaires | Publications monoparttenaires |
|-----------------------------|--|--------------------------------|-------------------------------|
| International | Revue à comité de lecture | 9 | 14 |
| | Ouvrages ou chapitres d'ouvrage | 1 | 1 |
| | Communications (conférence) | 1 | 9 |
| France | Revue à comité de lecture | | |
| | Ouvrages ou chapitres d'ouvrage | | |
| | Communications (conférence) | | 10 |
| Actions de diffusion | Articles vulgarisation | 1 | 1 |
| | Conférences vulgarisation | 2 | |
| | Autres | | |

Autres valorisations scientifiques (à détailler en E.3)

Ce tableau dénombre et liste les brevets nationaux et internationaux, licences, et autres éléments de propriété intellectuelle consécutifs au projet, du savoir faire, des retombées diverses en précisant les partenariats éventuels. Voir en particulier celles annoncées dans l'annexe technique).

| | Nombre, années et commentaires (valorisations avérées ou probables) |
|--|---|
| Brevets internationaux obtenus | |
| Brevet internationaux en cours d'obtention | |
| Brevets nationaux obtenus | |
| Brevet nationaux en cours d'obtention | |
| Licences d'exploitation (obtention / cession) | |
| Créations d'entreprises ou essaimage | |
| Nouveaux projets collaboratifs | Projet PRCI ANR-DFG META-WT : « Experimental investigation of seismic metamaterials: Application to wind farms with dense seismic arrays" (en cours d'évaluation 2021) |
| Colloques scientifiques | - Workshop « METAgenierie 2019 », 1st-5th July 2019, Oleron, France (40 participants). - Workshop « Premières journées du GDR META", 7-9th June 2016, Cargèse, France (35 participants). |
| Autres (préciser) | |

E.2 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Répertorier les publications résultant des travaux effectués dans le cadre du projet. On suivra les catégories du premier tableau de la section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** en suivant les normes éditoriales habituelles. En ce qui concerne les conférences, on spécifiera les conférences invitées.

Publications monopartenaires

- 1- M. Rupin and P. Roux, Journal of the Acoustical Society of America Express Letters 142(1), EL75-81, 2017.
- 2- S. Yves, F. Lemoult, M. Fink and G. Lerosey, Scientific Reports 7: 15359 (2017).
- 3- S. Yves, R. Fleury, F. Lemoult, M. Fink and G. Lerosey, New J. Phys. 19 (2017) 075003.
- 4- S. Yves, R. Fleury, T. Berthelot, F. Lemoult, M. Fink and G. Lerosey, Nature Communications, 8: 16023 (2017).
- 5- S. Yves, et al., "Measuring Dirac Cones in a Subwavelength Metamaterial", Phys. Rev. Lett., 121, 267601 (2018)
- 6- Lott, M., & Roux, P. (2019). Locally resonant metamaterials for plate waves: The respective role of compressional versus flexural resonances of a dense forest of vertical rods. *Fundamentals and Applications of Acoustic Metamaterials: From Seismic to Radio Frequency*, 1, 25-45.

7- Lott, M., & Roux, P. (2019). Effective impedance of a locally resonant metasurface. *Physical Review Materials*, 3(6), 065202

8- S. Yves, et al., "Left-handed band in an electromagnetic metamaterial induced by sub-wavelength multiple scattering", *Appl. Phys. Lett.*, 114, 111101 (2019)

9- Lott, M., Roux, P., Seydoux, L., Tallon, B., Pelat, A., Skipetrov, S., & Colombi, A. (2020). Localized modes on a metasurface through multiwave interactions. *Physical Review Materials*, 4(6), 065203.

10- S. Yves, T. Berthelot, G. Lerosey, and F. Lemoult, "Locally polarized wave propagation through crystalline metamaterials," *Phys. Rev. B*, vol. 101, p. 035127 (2020)

11- S. Yves, G. Lerosey, and F. Lemoult, "Structure-composition correspondence in crystalline metamaterials for acoustic valley-Hall effect and unidirectional sound guiding," *Europhysics Letters*, vol. 129, no 4, p. 44001 (2020)

12- M. Lanoy, F. Lemoult, A. Eddi, and C. Prada, "Dirac cones and chiral selection of elastic waves in a soft strip," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 117 (48), pp. 30186-30190 (2020).

13- Pomot, L., Payan, C., Remillieux, M., & Guenneau, S. (2020). Acoustic cloaking: Geometric transform, homogenization and a genetic algorithm. *Wave Motion*, 92, 102413.

14- Lott, M., & Roux, P. (2021). Random versus regular square lattice experimental comparison for a subwavelength resonant metasurface. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 149(5), 3645-3653.

15- S. Yves, G. Lerosey, and F. Lemoult, "Inducing topology in a wire medium based metamaterial", *Optical Materials Express*, vol. 11(3), pp. 821-841 (2021)

Publications pluripartenaires

1- Colombi, A., Guenneau, S., Roux, P., & Craster, R. V. (2016). Transformation seismology: composite soil lenses for steering surface elastic Rayleigh waves. *Scientific reports*, 6(1), 1-9.

2- Colombi, A., Roux, P., Guenneau, S., Gueguen, P., & Craster, R. V. (2016). Forests as a natural seismic metamaterial: Rayleigh wave bandgaps induced by local resonances. *Scientific reports*, 6(1), 1-7.

3- Roux, P., Rupin, M., Lemoult, F., Lerosey, G., Colombi, A., Craster, R. V. & Williams, E. G. (2017). New Trends Toward Locally-Resonant Metamaterials at the Mesoscopic Scale. *World Scientific Handbook of Metamaterials and Plasmonics*, 16, Elastic, Acoustic and Seismic Metamaterials, 2, 251-299.

- 4- Colquitt, D. J., Colombi, A., Craster, R. V., Roux, P., & Guenneau, S. R. L. (2017). Seismic metasurfaces: Sub-wavelength resonators and Rayleigh wave interaction. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 99, 379-393.
- 5- Colombi, A., Craster, R. V., Colquitt, D., Achaoui, Y., Guenneau, S., Roux, P., & Rupin, M. (2017). Elastic wave control beyond band-gaps: shaping the flow of waves in plates and half-spaces with subwavelength resonant rods. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 3, 10.
- 6- A Colombi, V Ageeva, RJ Smith, A Clare, R Patel, M Clark, D Colquitt, P Roux, S Guenneau RV Craster (2017), Enhanced sensing and conversion of ultrasonic Rayleigh waves by elastic metasurfaces, *Scientific Reports* 7 (1), 6750.
- 7- Craster, R., Colombi, A., & Roux, P. (2018). Elastic Metamaterials applied to Geophysics. *Impact*, 2018(5), 68-70.
- 8- Roux, P., Bindi, D., Boxberger, T., Colombi, A., Cotton, F., Douste-Bacque, I., ... & Pondaven, I. (2018). Toward seismic metamaterials: the METAFORET project. *Seismological Research Letters*, 89(2A), 582-593.
- 9- Lott, M., Roux, P., Garambois, S., Guéguen, P., & Colombi, A. (2020). Evidence of metamaterial physics at the geophysics scale: the METAFORET experiment. *Geophysical Journal International*, 220(2), 1330-1339.
- 10- Lott, M., Roux, P., Rupin, M., Colquitt, D., & Colombi, A. (2021). Negative index metamaterial through multi-wave interactions: numerical proof of the concept of low-frequency Lamb-wave multiplexing. *Scientific Reports*, 11(1), 1-8.

Conferences monopartenaires

International

- 1- S. Guenneau, Large scale metamaterials for ocean and seismic waves, Imperial Waves day, 15 juin 2017
- 2- S. Yves, " Topological Acoustic Polaritons: Robust Sound Manipulation at the Subwavelength Scale", Phononics, Juin 2017, Changsha, Chine.
- 3- S. Yves, "An acoustic metamaterial crystal with a graphene-like dispersion ", META'17, Juillet 2017, Incheon, Corée du Sud
- 4- Colombi, A. (2018). High performance computing for seismic metamaterials. In EGU General Assembly Conference Abstracts (p. 14325).
- 5- Lott, M ; GDR AMM - Advances in Mechanical Metamaterials, Londres, GB ; Mai 2018.
- 6- S. Guénneau, "Seismic metamaterials: recent progress and remaining challenges", Plenary lecture at 21st International Symposium on Nonlinear Acoustics (ISNA 2018), Santa Fe, 2018.

7- P. Roux, New trends towards seismic metamaterials, European workshop : Acoustic & mechanic metamaterials, July 9-11, London, 2018

8- Lott, M; Acoustical Society of America, San Diego, USA, Dec 2019.

9- S. Guenneau, Phononics, Tucson, USA, Jul. 2019 :

<https://phononics2019.phononics.org/conf/index.php/phononics/2019/pages/view/invited-speakers.html>

France

1- F. Lemoult, "Soda cans: a toy model of an acoustic metamaterial", Phonon School, Septembre 2017, Oléron

2- F. Lemoult, " Topological acoustic polaritons ", Interdisciplinary workshop on topological phenomena, Novembre 2017, Lyon.

3- P. Roux, "New trends toward seismic metamaterials", Interdisciplinary workshop on topological phenomena, Novembre 2017, Lyon.

4- P. Roux, « The METAFORET project », Journées du GDR Meta, Oléron, Juillet 2017

5- P. Roux, " The METAFORET project ", Ecole Interdisciplinaire, Rennes, Octobre 2017

6- G. Lerosey, "Tailoring locally resonant metamaterials: from local modifications to metamaterials crystals ", Marseille, Metamaterials, Aout 2017

7- M. Lott, A new trend toward seismic metamaterials: the metaforet project, 4th workshop on Seismic Metamaterials, Marseille, Avril 15-17, 2018.

8- P. Roux, « Seismic Metamaterials », journées du labo d'acoustique de l'IEMN, Lille, février 2018.

9- Lott, M ; GDR MecaWave - Metamateriaux sismiques, Marseille, FR ; Avril 2019.

10- M. Lott, Locally resonant metamaterials: Connection between multimodal dynamics and localization, GdR Complexe annual workshop, Paris, Avril 1-2, 2019.

11- S. Guenneau, conférence grand public sur Invisibilité et Fata Morgana avec les métamatériaux, Institut d'Etudes Scientifique de Cargèse, Août 19, 2019.

Conferences pluripartenaires

International

1- Colombi, A., Roux, P., Craster, R., & Guenneau, S. (2016, April). Introducing seismic metamaterials and their potential geophysical applications. In EGU General Assembly Conference Abstracts (pp. EPSC2016-18102).

Vulgarisation

1- Fev. 2017 : participation au documentaire scientifique diffusé dans l'émission Xenius (ARTE) disponible sur le site <https://www.dailymotion.com/video/x5b0fow>

2- Sept. 2018 : co-rédaction d'un article grand public (3 pages) intitulé « Research that really resonates » dans la revue en ligne Impact Objectives (www.impact.pub).

3- S Guenneau, S Enoch, A Colombi, P Roux, S Brûlé, Métamatériaux pour la protection sismique, Photoniques, 37 (2018)

4- S Brûlé, S Guenneau, Invisibilité sismique antique et forestière, in La cape d'invisibilité de Harry Potter inspire les physiciens, Hors-série Pour la Science 112, 22, 2021

E.3 LISTE DES ELEMENTS DE VALORISATION

*La liste des éléments de valorisation inventorie les retombées (autres que les publications) décomptées dans le deuxième tableau de la section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** On détaillera notamment :*

- *brevets nationaux et internationaux, licences, et autres éléments de propriété intellectuelle consécutifs au projet.*
- *logiciels et tout autre prototype*
- *actions de normalisation*
- *lancement de produit ou service, nouveau projet, contrat,...*
- *le développement d'un nouveau partenariat,*
- *la création d'une plate-forme à la disposition d'une communauté*
- *création d'entreprise, essaimage, levées de fonds*
- *autres (ouverture internationale,..)*

Elle en précise les partenariats éventuels. Dans le cas où des livrables ont été spécifiés dans l'annexe technique, on présentera ici un bilan de leur fourniture.

E.4 BILAN ET SUIVI DES PERSONNELS RECRUTES EN CDD (HORS STAGIAIRES)

Ce tableau dresse le bilan du projet en termes de recrutement de personnels non permanents sur CDD ou assimilé. Renseigner une ligne par personne embauchée sur le projet quand l'embauche a été financée partiellement ou en totalité par l'aide de l'ANR et quand la contribution au projet a été d'une durée au moins égale à 3 mois, tous contrats confondus, l'aide de l'ANR pouvant ne représenter qu'une partie de la rémunération de la personne sur la durée de sa participation au projet.

Les stagiaires bénéficiant d'une convention de stage avec un établissement d'enseignement ne doivent pas être mentionnés.

Les données recueillies pourront faire l'objet d'une demande de mise à jour par l'ANR jusqu'à 5 ans après la fin du projet.

| Identification | | | | Avant le recrutement sur le projet | | | Recrutement sur le projet | | | | Après le projet | | | | |
|----------------|----------|------------------------------------|------------------------------|---|-------------------------------------|--|---------------------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Nom et prénom | Sexe H/F | Adresse email (1) | Date des dernières nouvelles | Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement | Lieu d'études (France, UE, hors UE) | Expérience prof. Antérieure, y compris post-docs (ans) | Partenaire ayant embauché la personne | Poste dans le projet (2) | Durée missions (mois) (3) | Date de fin de mission sur le projet | Devenir professionnel (4) | Type d'employeur (5) | Type d'emploi (6) | Lien au projet ANR (7) | Valorisation expérience (8) |
| Lott Martin | H | Martin.lott@univ-grenoble-alpes.fr | Sept. 2021 | doctorat | France | 3 | ISTerre | Post-doc | 39 | 31/01/2021 | Post-doc | Université Turin (Italie) | enseignement et recherche publique | Non | oui |
| Simon Yves | H | simon.yveslambert@gmail.com | Juillet 2021 | doctorat | France | 3 | Institut Langevin | Post-doc | 6 | 28/02/2019 | Post-Doc | College University of New-York | enseignement et recherche publique | Non | Oui |
| Lanoy Maxime | H | maxime.lanoy@gmail.com | Sept. 2021 | doctorat | France | 5 | Institut Langevin | Post-doc | 18 | 30/06/2020 | Maître de Conférences (LAUM) | Le Mans Université | enseignant-chercheur | Non | Oui |

Aide pour le remplissage

(1) **Adresse email** : indiquer une adresse email la plus pérenne possible

(2) **Poste dans le projet** : post-doc, doctorant, ingénieur ou niveau ingénieur, technicien, vacataire, autre (préciser)

(3) **Durée missions** : indiquer en mois la durée totale des missions (y compris celles non financées par l'ANR) effectuées sur le projet

(4) **Devenir professionnel** : CDI, CDD, chef d'entreprise, encore sur le projet, post-doc France, post-doc étranger, étudiant, recherche d'emploi, sans nouvelles

(5) **Type d'employeur** : enseignement et recherche publique, EPIC de recherche, grande entreprise, PME/TPE, création d'entreprise, autre public, autre privé, libéral, autre (préciser)

(6) **Type d'emploi** : ingénieur, chercheur, enseignant-chercheur, cadre, technicien, autre (préciser)

(7) **Lien au projet ANR** : préciser si l'employeur est ou non un partenaire du projet

(8) **Valorisation expérience** : préciser si le poste occupé valorise l'expérience acquise pendant le projet.

Les informations personnelles recueillies feront l'objet d'un traitement de données informatisées pour les seuls besoins de l'étude anonymisée sur le devenir professionnel des personnes recrutées sur les projets ANR. Elles ne feront l'objet d'aucune cession et seront conservées par l'ANR pendant une durée maximale de 5 ans après la fin du projet concerné. Conformément à la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 modifiée, relative à l'Informatique, aux Fichiers et aux Libertés, les personnes concernées disposent d'un droit d'accès, de rectification et de suppression des données personnelles les concernant. Les personnes concernées seront informées directement de ce droit lorsque leurs coordonnées sont renseignées. Elles peuvent exercer ce droit en s'adressant l'ANR (<http://www.agence-nationale-recherche.fr/Contact>).