

## Titres et travaux

### Philippe Roux - Octobre 2019

#### Résumé de mon travail de recherche

Je suis un physicien expérimentateur possédant une solide formation dans le domaine de la propagation des ondes acousto-élastiques aussi bien à l'échelle ultrasonore du domaine médical (mm) qu'à l'échelle de l'acoustique sous-marine (km) ou de la géophysique (centaine de kms). Mon parcours scientifique s'est construit au gré de plusieurs mutations géographiques qui furent autant de mutations thématiques.

Pendant ma thèse au Laboratoire Ondes et Acoustique (sous la houlette de Mathias Fink, 1994-1997), j'ai travaillé via des manip de laboratoire sur le concept de retournement temporel et sur ses applications, d'une part à la propagation dans les guides d'ondes ultrasonores, et d'autre part à l'interaction entre une onde acoustique et un filament de vorticité.

Par la suite, j'ai poursuivi ma jeune carrière de chercheur par deux séjours au Scripps Institute of Oceanography (San Diego, Californie), de sept. 1997 à déc. 1998 en post-doc et de janv. 2002 à juillet 2005 lors d'un détachement du CNRS. Durant mon premier séjour, j'ai approfondi mes connaissances théoriques et numériques en acoustique sous-marine. Encadré par W.A. Kuperman, je me suis confronté pour la première fois à l'analyse de données océaniques en participant à une expérience en mer. Lors du second séjour, j'ai crée et développé le laboratoire d'acoustique ultrasonore au sein du Scripps Inst. of Oceanography où j'obtins un poste de chercheur associé en Janv. 2004 (tenured position). Ma recherche s'orienta alors vers la cohérence spatio-temporelle du bruit ambiant en acoustique sous-marine et en géophysique. Malgré une grande implication dans les expériences de laboratoire, j'ai passé là-bas plus de trois mois en mer sur trois expériences successives de retournement temporel dans les guides d'onde océaniques (2003, 2004 et 2005) en collaboration avec le NATO Undersea Saclant Center (La Spezia, Italie).

Entre ces deux séjours, fraîchement recruté au CNRS (section 5 : physique de la matière condensée), j'ai continué à Paris (LOA, devenu maintenant l'Institut Langevin) ma recherche sur la cohérence du champ acoustique en insistant sur la propagation d'ondes dans les cavités fortement r verb rantes (Jan. 1999-Déc. 2001). Financé par une ACI jeune chercheur, j'ai travaillé durant cette période sur le concept de résonateur acoustique en concevant un « bazooka   retournement temporel » capable de générer des ondes de chocs de très forte amplitude avec quelques transducteurs connectés à une électronique basse-puissance.

Depuis juillet 2005, nous avons r -emménagé pour de bon en France   Grenoble où j'ai crée l'équipe d'acoustique expérimentale au sein du LGIT (devenu aujourd'hui l'Institut des Sciences de la Terre) grâce à une ANR Chaire d'excellence Junior. Les interactions restent fortes avec San Diego où j'effectue un à deux séjours par an (un mois en juillet 2013, par exemple). Avec Michel Campillo comme proche collaborateur, mes thèmes de recherche se sont naturellement orientés vers la sismologie et la géophysique. Cette mobilité thématique a été accompagnée par un changement de la section 5 vers la section 9 du CNRS en 2013. Mes travaux en géophysiques sont

liés à l'utilisation du bruit ambiant pour l'imagerie et le monitoring des enveloppes superficielles de la terre sur des distances de propagation allant de la dizaine de mètres au millier de kilomètres. Des objets géologiques comme les zones de faille, les volcans ou les glaciers font partie de mes objets d'étude au quotidien.

Toutefois, en dehors de la géophysique, je reste fondamentalement attaché à la physique expérimentale et à la physique des ondes en milieu complexe comme le montre mes derniers travaux sur les méta-matériaux. Par exemple, je coordonne le projet ANR METAFORET (2016-2020) qui pose la question du comportement d'une forêt dense sur les ondes de surface, les arbres jouant le rôle surprenant de résonateurs couplés pour les ondes sismiques.

Pour finir ce résumé par quelques points saillants, j'ai été nommé « Fellow » de l'Acoustical Society of America en novembre 2004. Je fus promu Directeur de Recherche au CNRS en octobre 2009 puis DR1 en 2016. J'ai bénéficié de la Prime d'Excellence Scientifique de 2010 à 2013. J'ai été récompensé par la Medwin Prize in Acoustical Oceanography attribuée par l'Acoustical Society of America (ASA) en juin 2013. Entre 2012 et 2017, j'ai dirigé l'équipe Ondes au sein d'ISTerre (55 personnes dont 17 chercheurs permanents et 7 ingénieurs/techniciens). Je suis membre de la commission 18 du comité national du CNRS (2016-2021) après avoir été membre de la commission CGRA1 de l'Institut pour le Recherche et le développement (IRD) de 2010 à 2014. Enfin, je serai le prochain directeur d'ISTerre (~280 personnes dont 150 permanents) pour les cinq années à venir à partir de décembre 2019 ...

<b>Table des matières</b>	<b>Pages</b>
Résumé	1
I- Curriculum Vitae	3
II- Activité de recherche	5
III- Enseignement, formation et diffusion de la culture scientifique	37
IV- Transfert technologique, relations industrielles et valorisation	40
V- Encadrement, animation et management de la recherche	42
VI- Projet de recherche	45

## **I - Curriculum Vitae – Philippe Roux**

### ***Etat Civil***

Philippe ROUX,  
né le 10 février 1969 (50 ans)  
marié, six enfants

résidant : 26, rue Raoul Blanchard  
38000 Grenoble

### ***Pages web***

<https://isterre.ujf-grenoble.fr/annuaire/pages-web-du-personnel/philippe-roux>  
<https://publons.com/researcher/1758997/philippe-roux/>  
[https://www.researchgate.net/profile/Philippe\\_Roux2/](https://www.researchgate.net/profile/Philippe_Roux2/)

### ***Formation***

2001 Habilitation à Diriger les Recherches, Université Paris VI.  
1997 Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, spécialité Physique des Liquides.  
1994 Ecole Normale Supérieure (Paris), spécialité Physique.

### ***Activités professionnelles***

Oct. 2016 Directeur de Recherche DR1 à ISTERre.  
Oct. 2009 Directeur de Recherche DR2 à ISTERre.  
Juil. 2005 Chargé de Recherche CR1 à ISTERre, UMR 5275, Grenoble.  
Jan. 2002 Visiting scientist puis Research Associate (tenured position) au MPL (USA).  
Dec. 1998 Chargé de Recherche CNRS (CR2, puis CR1 en octobre 2001) au LOA.  
Sept. 1997 Post-doc au Marine Physical Laboratory (MPL), Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego, USA.  
Avril 1997 Thèse au Laboratoire Ondes et Acoustique (LOA), UMR 7587, Paris.

### ***Distinctions***

2013 Medwin Prize in Acoustical Oceanography.  
2012 Excellence in Refereeing for Journal of Geophysical Research- Solid Earth (JGR).  
2010 Prime d'Excellence Scientifique.  
2009 Best Paper Award of the EAGE.  
2005 Chaire d'Excellence Junior (ANR).  
2004 Fellow of the Acoustical Society of America.

### ***Publications et Citation index (Sept 2019)***

- 191 articles dans des journaux à comité de lecture (5 articles avec plus de 250 citations), 4 chapitres de livre, 45 actes de conférences internationales, >200 participations orales dans des congrès internationaux, 40 conférences invitées.  
- Citation index ~ 5500, h-index = 35, <math>\langle h \rangle = 28.8</math> (Source ISI Web of Knowledge).

### ***Points marquants sur la période 2015-2019***

- A partir de déc. 2019 : Directeur du laboratoire ISTERre  
- Juin 2017 : PI du projet RESOLVE (210 keuros).  
- Depuis sept. 2016 : Membre nommé de la section 18 du CNRS.  
- Juillet 2016 : PI du projet ANR METAFORÉ (310 keuros).

- Depuis janv. 2016 : Membre du bureau du GDR META.
- 2012-2017: Direction de l'équipe Ondes au sein d'ISTerre.
- 2012-2016 : Membre nommé de la commission CGRA1 à l'IRD.

***Collaborations actives (number of co-authored papers)***

- W.A. Kuperman (Underwater Acoustics), Scripps Inst. of Oceanography, San Diego (USA) – 47 papers.
- M. Campillo (Geophysics), ISTerre, Grenoble (France) – 36 papers.
- M. Fink (Complex Wave Physics), Institut Langevin, Paris (France) – 23 papers.
- J. Mars (Signal Processing), GIPSA-Lab, Grenoble (France) – 9 papers.
- J. Virieux (Inversion), ISTerre, Grenoble (France) – 3 papers.
- Y. Ben Zion (Fault Zones), University of South California (USC), Los Angeles (USA) – 6 papers
- P. Johnson (Rock Physics), Los Alamos Laboratory, New Mexico (USA) – 1 paper.

***Mobilité thématique***

J'ai été recruté au CNRS (déc. 1998) en section 5 sur un thème de recherche lié à la « propagation d'ondes en milieu complexe ». C'est aussi la section 5 qui m'a promu directeur de recherche en 2009 suite à mon retour à Grenoble après plusieurs années passées aux USA (2002-2005). Depuis quelques années, cependant, mes axes de recherche correspondent mieux aux thématiques naturelles de la section 9, avec une prédilection pour « l'imagerie et le monitoring sismo-acoustique ». Même si ces deux sections partagent beaucoup de thèmes communs la section 5 est plutôt orientée « matière » et la 9 plutôt « ondes ». La section 9 présente aussi une préférence pour la physique appliquée qui me correspond parfaitement en tant que physicien expérimentateur. Ce sont ces différences qui ont motivé mon changement de section en 2013, ainsi que le rattachement de notre unité (ISTerre) à l'INSIS comme unité de rattachement secondaire (2014). Ce changement de section correspond donc à une évolution thématique progressive de ma carrière de physicien, en accord avec mon appartenance avec un laboratoire clairement orienté vers les sciences de la terre.

## II- Résumé de l'activité de recherche sur la période 2015-2019

### Préambule

Ce rapport d'activité a deux fonctions. D'une part, permettre l'évaluation à vague de mes travaux de recherche à 5 ans. D'autre part, je fais pour la première fois acte de candidature pour une promotion au titre de DRCE1.

Qu'est-ce donc qu'une promotion DRCE1 ?

En tant que membre d'une section du CNRS (section 18 : sciences de la terre), je suis moi-même appelé à évaluer et discuter de ce type de promotion chaque année. Selon moi, le passage de DR1 à DRCE1 se justifie sur l'excellence scientifique comme critère fondamental, bien entendu, mais aussi sur deux critères complémentaires que sont (1) l'amplitude et la diversité des tâches collectives effectuées et (2) l'originalité et la visibilité du travail de recherche, c'est-à-dire la « trace » que laisse le chercheur au sein de sa communauté scientifique. Autrement dit, il y a beaucoup d'excellents chercheurs dans toutes les sections du CNRS dont le dossier de publication justifierait aisément une promotion DRCE1. Il y en a moins qui, sur la base d'un dossier de qualité, font le choix de s'investir franchement dans des tâches collectives très chronophages comme la direction d'un grand laboratoire et/ou la participation active à des instances d'évaluation nationale. Il y en a encore moins dont l'originalité et la visibilité des travaux de recherche, difficile à estimer mais qui peut être parfois perçue à travers le rayonnement national et international, font que le chercheur laisse une empreinte claire dans la communauté des chercheurs de son domaine.

De mon côté, malgré ma relative jeunesse (50 ans), je pense avoir quelques atouts pour cette promotion. En premier lieu, mon dossier de publication me semble suffisant pour franchir ce palier. Bien sûr, je ne suis pas à même de jauger de l'originalité et de la visibilité de ma recherche et je laisse à la section 9 le soin d'effectuer ce jugement. En revanche, je m'investis clairement depuis quelques années dans les tâches collectives au niveau national et au niveau local. En particulier, la direction d'ISTerre est pour moi une étape importante dans la dernière phase de ma carrière, à savoir les 10-15 ans à venir. A dire vrai, je ne sais pas trop où tout cela me mènera dans 5 ans : à l'issue de cette direction, reviendrai-je simple chercheur au sein d'ISTerre ou serai-je intéressé par d'autres missions au niveau local/national ? Bref, c'est sur ces éléments que j'estime légitime ma première candidature au titre de DRCE1...

J'aime à décrire mon parcours de chercheur comme autant de rencontres fondamentales qui ont marqué fortement mes inflexions thématiques depuis mon doctorat. Trois chercheurs de haut niveau furent à ce titre des personnes clefs dans ma carrière : Mathias Fink à Paris, W.A. Kuperman à San Diego et Michel Campillo à Grenoble. Ces trois chercheurs de renommée internationale sont ce qui se fait de mieux dans le domaine des ultrasons pour M. Fink, de l'acoustique sous-marine pour W.A. Kuperman et de la sismologie pour M. Campillo. Mon parcours scientifique se situe aux interfaces entre ces trois domaines pour lesquels la propagation d'ondes acoustiques et/ou élastiques est un moyen d'étude privilégié. Je dois donc beaucoup à ces trois personnes, au niveau scientifique comme au niveau humain, et j'espère avoir contribué de mon côté à amplifier leurs travaux en ouvrant des routes pour les futur.e.s jeunes chercheur.e.s intéressé.e.s par la physique des ondes.

Si je devais caractériser en deux mots ces différentes routes que j'ai empruntées et parfois défrichées, je dirai qu'elles ont trait **(1) à l'étude de la cohérence spatio-temporelle du bruit ambiant en acoustique et en sismologie, (2) à l'utilisation des réseaux denses de capteurs en géophysique et (3) au développement d'expériences de laboratoire pour appréhender la physique complexe des ondes par aller-retours successifs entre la petite et la grande échelle.** C'est d'ailleurs parfois en mêlant ces trois aspects de ma recherche que j'ai obtenu les résultats scientifiques les plus probants...

La physique des ondes est à l'interface de plusieurs disciplines particulièrement actives dans la région Rhône-Alpes et plus particulièrement à Grenoble : la physique, la mécanique, la géophysique, le traitement du signal, la médecine et la biologie. Ainsi, plusieurs laboratoires de Grenoble ont inscrit la propagation d'ondes, en milieu solide ou fluide, au nombre de leurs thèmes de recherche. Il s'agit notamment d'ISTerre pour la géophysique, du LIPhy dans le domaine de la physique du vivant, du LPM<sup>2</sup>C dans l'étude fondamentale de la diffusion multiple, du LEGI dans le domaine de l'interaction son-vorticité ou encore du GIPSA-Lab en traitement du signal. Depuis plus de vingt ans, les chercheurs impliqués ont pu confronter leurs approches et leurs résultats à travers la succession des Groupes de Recherche interdisciplinaires POAN, PRIMA, ONDES, IMCODE, MESOIMAGE, META et COMPLEXE. Je me considère moi-même comme un enfant de cette école pluridisciplinaire « à la française » et j'estime de mon devoir de rendre la pareille aux plus jeunes en organisant régulièrement (toutes les années impaires) des écoles d'été du même type depuis 2011.

**Depuis mon retour en France (2005), un des axes principaux de mon travail fut de développer l'Equipe d'Acoustique Expérimentale au sein d'ISTerre. La spécificité et l'originalité du laboratoire est de travailler avec une plateforme expérimentale multi-échelles à vocation pluridisciplinaire sur laquelle peuvent s'appuyer plusieurs laboratoires dans le domaine de la physique ondulatoire.**

Ce travail de recherche repose sur mon bagage scientifique en acoustique ultrasonore et sur plusieurs années d'expérience dans une grande université américaine (UCSD, Californie). En effet, lors de mon second séjour à San Diego (janv. 2002- juil. 2005), j'avais créé et développé un laboratoire ultrasonore dans lequel nous expérimentions à échelle réduite les phénomènes de propagation acoustique observés dans l'océan. En contrôlant à loisir l'ensemble des paramètres du milieu (vague, nombre et profondeur des sources/récepteurs, fluctuations de température ou de densité, profondeur du guide d'onde), cet outil nous avait permis de faire des progrès méthodologiques dans le domaine de la tomographie océanique, de la détection de cibles en milieu peu profond, de la communication sous-marine,... J'ai reproduit cette plateforme ultrasonore à Grenoble dès mon arrivée et mon but fut d'étendre son champ d'investigation à la géophysique et plus généralement à la propagation d'ondes acousto-élastiques en milieu complexe. Ainsi, un modèle de croûte terrestre peut être reproduit à l'échelle du laboratoire pour étudier la conversion de l'énergie générée par les microséismes océaniques en ondes de Rayleigh sur le continent. De la même façon, la propagation acoustique en régime de diffusion multiple dans les nuages de bulles rend compte à une échelle mésoscopique (et donc facile à manipuler) de phénomènes ondulatoires observés à l'échelle cristalline.

**Sur la base de cette plateforme expérimentale, deux mots-clés sont à la base de mon travail de recherche : (1) les approches multi-échelles et (2) les réseaux denses multi-capteurs.**

- (1) On appelle milieu complexe pour les ondes tout milieu pour lequel la propagation est dominée par les phénomènes de réfraction, dispersion, diffusion et/ou réverbération. Aborder un phénomène ondulatoire complexe simultanément à l'échelle réelle et à l'échelle du laboratoire permet de simplifier voire de contrôler cette complexité en jouant séparément sur différents paramètres. Ainsi, en reprenant l'exemple de la tomographie océanique, un chenal acoustique sous-marin se transforme en un guide d'onde à l'échelle ultrasonore, guide d'onde dans lequel on peut contrôler à loisir la hauteur des vagues qui jouent un rôle important sur l'aspect aléatoire de la propagation acoustique.

- (2) A l'échelle réelle comme à l'échelle du laboratoire, il n'y a plus aujourd'hui de limitation technologique à l'utilisation de réseaux de sources/récepteurs dans l'étude des phénomènes ondulatoires en acoustique et en élasticité. Par exemple, le LAUM (Le Mans) est aujourd'hui équipé d'un vibromètre laser 3D combiné à un robot mécanisé qui permet d'enregistrer les trois composantes du champ élastique en tout point de la surface de pièces mécaniques de toute forme et de tout volume. De la même façon, les géophysiciens n'ont plus peur d'installer plusieurs milliers de capteurs sismiques sur des objets géologiques particuliers comme les failles ou les volcans pour mieux comprendre les limites de résolution spatiale des processus d'inversion.

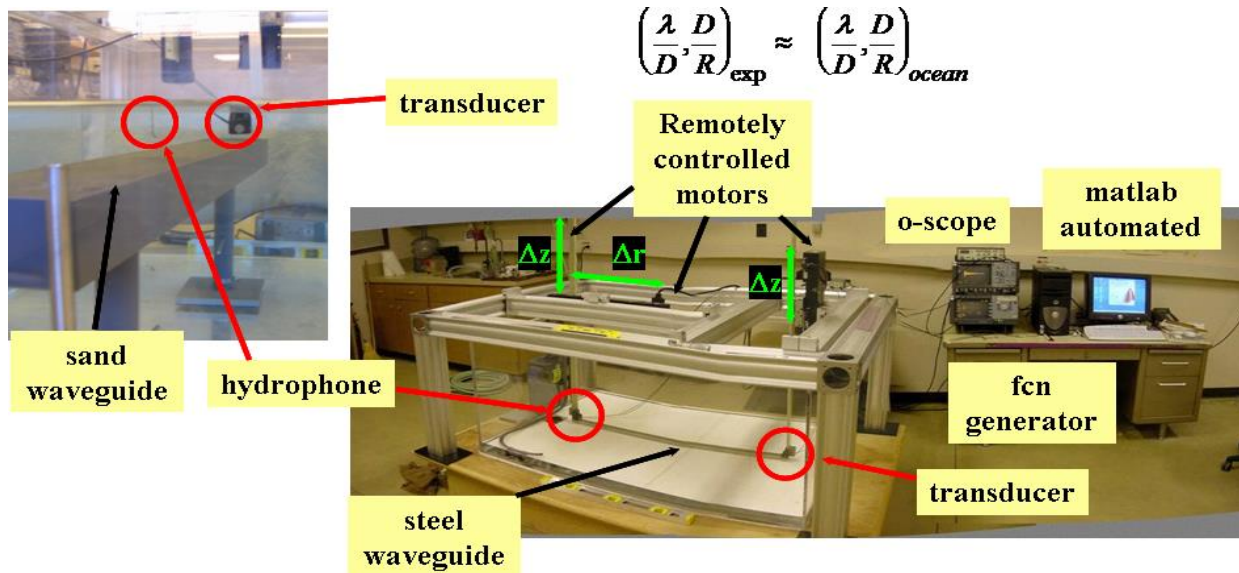
Cependant, l'utilisation de réseaux multi-éléments est à double tranchant : d'un côté, on multiplie les angles de vue sur la propagation des ondes et on améliore de cette façon la résolution comme cela fut démontré régulièrement depuis Shapiro et al (2005) en tomographie sismique passive; d'un autre, on augmente énormément la quantité d'information à enregistrer, traiter et exploiter au risque de perdre de vue les différents phénomènes physiques qui affectent la propagation d'ondes. Pour les ondes en milieu complexe (que l'on observe aussi bien au sein de la chambre magmatique d'un volcan ou au cœur d'un banc dense de poissons en mer), nous sommes à mon goût entrés dans une ère où la donnée dans son ensemble est de meilleure qualité que la compréhension physique ou numérique que nous avons des mécanismes mis en jeu. Même si l'apparition de l'intelligence artificielle dans le domaine des ondes semble séduisante et de toute façon inéluctable, je ne suis pas sûr que les techniques d'apprentissage supervisé (Deep Learning, Machine Learning ou autres) aient réponse à tout...

En pratique, en conjuguant les approches multi-échelles et les réseaux denses de capteurs, une façon d'avancer est de simplifier la complexité des milieux naturels (terre, mer) tout en conservant la résolution spatiale nécessaire pour l'imagerie et/ou le monitoring des phénomènes ondulatoires complexes. Le but ultime est d'utiliser les ondes pour caractériser au mieux un milieu naturel, d'apprécier sa complexité et la modéliser, de le décrire à des fins d'imagerie ou de monitoring en géophysique, en acoustique ou en physique fondamentale.

Pour réaliser des expériences multi-échelles et multi-éléments sur le terrain et en laboratoire, j'ai donc équipé l'Equipe d'Acoustique Expérimentale à ISTerre de plusieurs électroniques d'acquisition et des capteurs sources/récepteurs associés. Ces outils permettent d'étudier des phénomènes de physique ondulatoire sur six décades en fréquence allant du Hz au MHz. Par exemple, la dernière acquisition (sept. 2014) est un échographe ultrarapide qui effectue formation

de voies et acquisition dynamique en temps réel pour l'étude des déformations transitoires d'un gel sous contrainte de friction.

A l'aide de ces systèmes, (pour plus de description, voir les films en bas de la page web <https://www.isterre.fr/annuaire/member-web-pages/philippe-roux/article/description-of-acoustic-experimental-facilities.html>), mon groupe multiplie les approches multi-échelles et l'utilisation de réseaux de transducteurs pour appréhender la propagation d'ondes acoustiques et élastiques en géophysique, en acoustique sous-marine (Fig. 1) et dans les régimes ultrasonores mêlant la diffusion multiple, l'interaction son-vorticité ou les déformations transitoires.



**Fig. 1 :** Dispositif expérimental à l'échelle ultrasonore permettant de reproduire la physique d'un guide d'onde océanique complexe (à gauche). Les rapports d'échelle entre la longueur d'onde  $\lambda$ , la distance de propagation  $R$  et la profondeur du guide d'onde  $D$  respectent les conditions expérimentales à l'échelle réelle.

Par ailleurs, ISTERre a structuré durant le dernier quinquennat une partie de ses ingénieurs/techniciens en service et l'un d'entre eux, le Service pour l'Instrumentation Géophysique (SIG), regroupe 7 ITA qui organisent et gèrent avec les chercheurs les expériences de terrain à grande échelle. Par exemple, j'ai bénéficié de ce service pour organiser une expérience géophysique en oct. 2016 avec l'utilisation de plus de 1000 géophones et de 150 sources sismiques dans le cadre de l'ANR METAFORÉ. De la même façon, l'expérience RESOLVE m'a permis d'installer 100 géophones sur le glacier d'Argentière à 2500 m d'altitude en avril 2018, avec en complément tout un ensemble de mesures indépendantes obtenus par GPS, capteur de pression sous-glaciaire ou radar électromagnétique. Dans les 5 ans à venir, le matériel géophysique déployé par le laboratoire (et mutualisé à l'échelle de l'Observatoire de Grenoble) va considérablement se développer avec l'ajout de 400 géophones financés par une ERC Consolidator (PI Florent Brenguier, 2018).

L'atout d'ISTERre comme laboratoire internationalement reconnu en sciences de la terre (l'Université Grenoble Alpes est classé 4<sup>ème</sup> en Geochemistry/Geophysics dans le dernier classement CWUR 2018-1019) et **ma contribution scientifique spécifique à cette renommée résident donc dans ces approches multi-échelles qui permettent d'isoler et d'étudier au**



## **laboratoire des mécanismes physiques particuliers et de vérifier sur le terrain par la mesure et l'observation la combinaison de tous les processus physiques mis en jeu.**

Dans la suite de ce rapport d'activité, je m'attacherai à décrire quelques applications de la physique des ondes en milieu complexe à travers des expériences à petites et grandes échelles et l'utilisation de réseaux denses de capteurs. Mon projet de recherche permettra de compléter les manques de ce rapport, qui ne prétend pas à l'exhaustivité, en insistant sur les dernières réalisations expérimentales et les projets en cours.

### **1- Corrélation du bruit sismique ambiant : une nouvelle méthode d'imagerie et de monitoring de la terre.**

Le meilleur exemple de l'interdisciplinarité au cœur de mes sujets de recherche est le dynamisme actuel autour du thème de l'imagerie passive en géophysique, en acoustique sous-marine et dans le domaine des ultrasons. L'engouement autour de l'utilisation du bruit ambiant en physique des ondes a poussé Michel Campillo et moi-même à co-diriger quatre workshops d'une semaine à Cargèse en 2011, 2013, 2015 et 2017 : « Passive Imaging and Monitoring in Wave Physics: from Seismology to Ultrasound ». Une cinquième édition aura lieu en septembre 2019, organisé cette fois par la nouvelle vague de jeunes géophysiciens/sismologues du laboratoire.

**De façon générale, la tomographie passive se résume au double problème suivant :**

**1) Peut-on extraire du bruit ambiant mesuré en deux points la fonction de Green entre ces deux points, cette fonction de Green incluant à la fois les ondes de surface et les ondes de volume rencontrées en sismologie, par exemple ?**

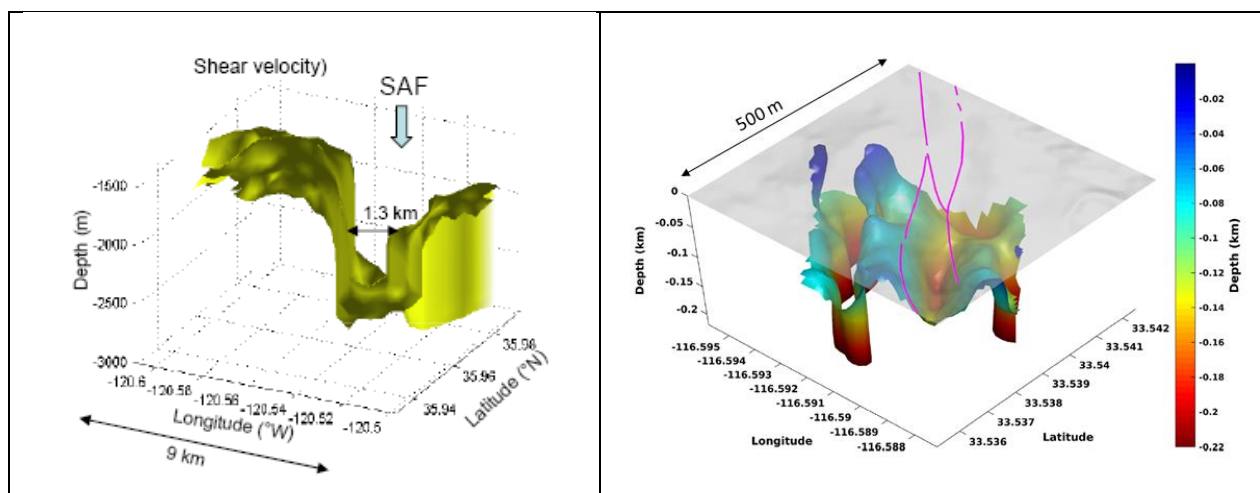
**2) La qualité de la fonction de Green extraite du bruit acoustique ou sismique ambiant est-elle suffisante pour reconstruire une image du milieu ?**

Ces dernières années, des expériences ont validé le premier point dans tous les domaines de la physique ondulatoire. La fonction de Green émerge de la corrélation d'un champ diffus mesuré en deux points sur de longues périodes de temps. Le champ diffus est issu du bruit ambiant comme en géophysique [Campillo and Roux, 2014] et en acoustique sous-marine [Fried et al, 2008 ; Leroy et al, 2012 ; Lani et al, 2013]) ou de codas de sources actives en régime de diffusion multiple comme en géophysique [Campillo and Paul, 2003 ; Froment et al, 2010] et en acoustique ultrasonore [Lobkis and Weaver, 2001; Derode et al, 2003; Larose et al, 2008]).

En revanche, dans la plupart des cas, seule une estimation de la fonction de Green est obtenue, estimation qui dépend principalement de la distribution spatiale et temporelle des sources de bruit utilisées. Ainsi, en géophysique, l'onde de Rayleigh (onde de surface) est facilement obtenue car cette onde est largement excitée par les sources de bruit ambiant de type « océanique » dans la gamme de fréquence [0.1-0.5 Hz]. En acoustique sous-marine, la fonction de Green est, quant à elle, pondérée en amplitude par le fait que les sources de bruit sont principalement présentes à la surface de l'océan (nuages de bulles liés aux vagues et bruit de navires). De nombreux travaux théoriques ont étudié le problème en espace libre, dans un guide d'onde ou dans une cavité [Snieder, 2004 ; Roux et al, 2005 ; Colombi et al, 2014]. La variance de la fonction de corrélation et sa convergence vers la fonction de Green ont été étudiées de façon théorique et expérimentale. Enfin, le bruit ambiant étant souvent difficile à maîtriser, le problème a aussi été approché en utilisant une distribution de sources incohérentes et non maîtrisées, comme le bruit d'un bateau le

long de sa trajectoire en mer ou la coda d'une collection de séismes en géophysique [Roux et al, 2004 ; Chaput et al, 2016].

Concernant le deuxième point mentionné ci-dessus, il reste bien entendu beaucoup à faire et à comprendre dans le domaine de la tomographie passive. En particulier, reconstruire une image du milieu à partir du simple bruit ambiant est un problème passionnant mais toujours ouvert. La première carte de vitesse d'ondes de surface fut obtenue en Californie du sud début 2005 à partir d'ondes de Rayleigh [Shapiro et al, 2005]. Plus récemment (2009), la faille de San Andreas a été représentée en 3D dans la région de Parkfield (Californie) via l'extraction d'ondes de Love du bruit sismique ambiant (Fig. 2a). D'autres images encore plus récentes de la faille de San Jacinto (2019) apportent toujours plus de détails sur la structure « en millefeuille » de la zone endommagée à partir d'un réseau dense d'environ 1100 capteurs en surface (Fig. 2b).

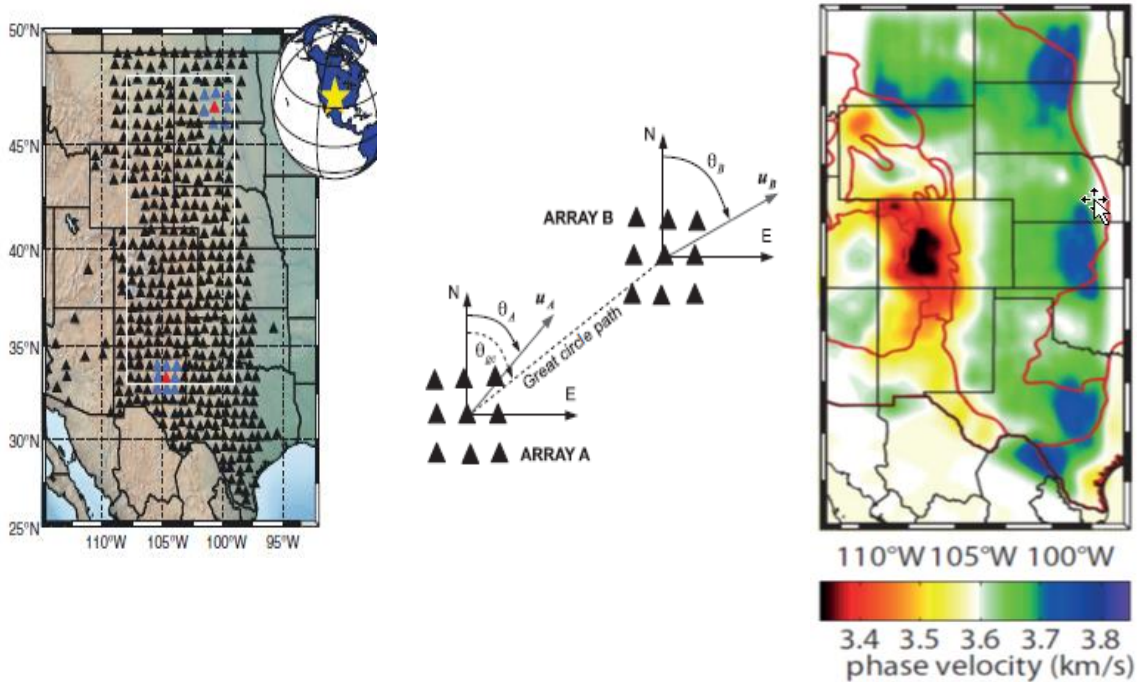


**Fig. 2:** (Gauche) Faille de San Andrés (SAF, Californie) : Image 3D par corrélation de bruit sismique ambiant (Roux, 2009). (Droite) Faille de San Jacinto (Californie): Représentation iso-vitesse ( $V_s=850$  m/s) montrant la compaction de la zone fracturée en plusieurs feuillets verticaux sur les premières centaines de mètres de profondeur. La trace de la faille est représentée en surface par le trait continu violet (Mordret et al, 2019).

Ces résultats très encourageants montrent que nous pouvons atteindre un objectif de super-résolution en imagerie géophysique à des échelles locales (<20 km, Roux et al, 2011) et globales (~1000 km, Boue et al, 2014) via les ondes de surface (Rayleigh ou Love). Dans les deux cas, l'inversion tomographique est faite à partir des temps de trajets mesurés entre sismomètres en utilisant un noyau d'inversion basé sur le tracé de rayons. Contrairement à une tomographie classique où la mesure des temps est issue de sources actives maîtrisées, la tomographie passive est le fruit de la corrélation de bruit ambiant dont on espère qu'elle satisfait à des conditions de stationnarité et d'isotropie dans la bande spectrale considérée. La qualité ou les biais observés sur l'inversion tomographique dite « de bruit ambiant » est ainsi directement liée aux propriétés spatiales et temporelles du bruit sismique ainsi qu'à la couverture en surface du réseau de capteurs.

Ces toutes dernières années, deux progrès majeurs ont vu le jour dans le domaine toujours très actif de la tomographie sismique passive. D'une part, le développement de réseaux denses de capteurs est devenu la norme en sciences de la terre, à petite comme à grande échelle (Roux et al, 2016). Ainsi, nous avons exploité la partie centrale du réseau américain USArray (400 capteurs sismiques)

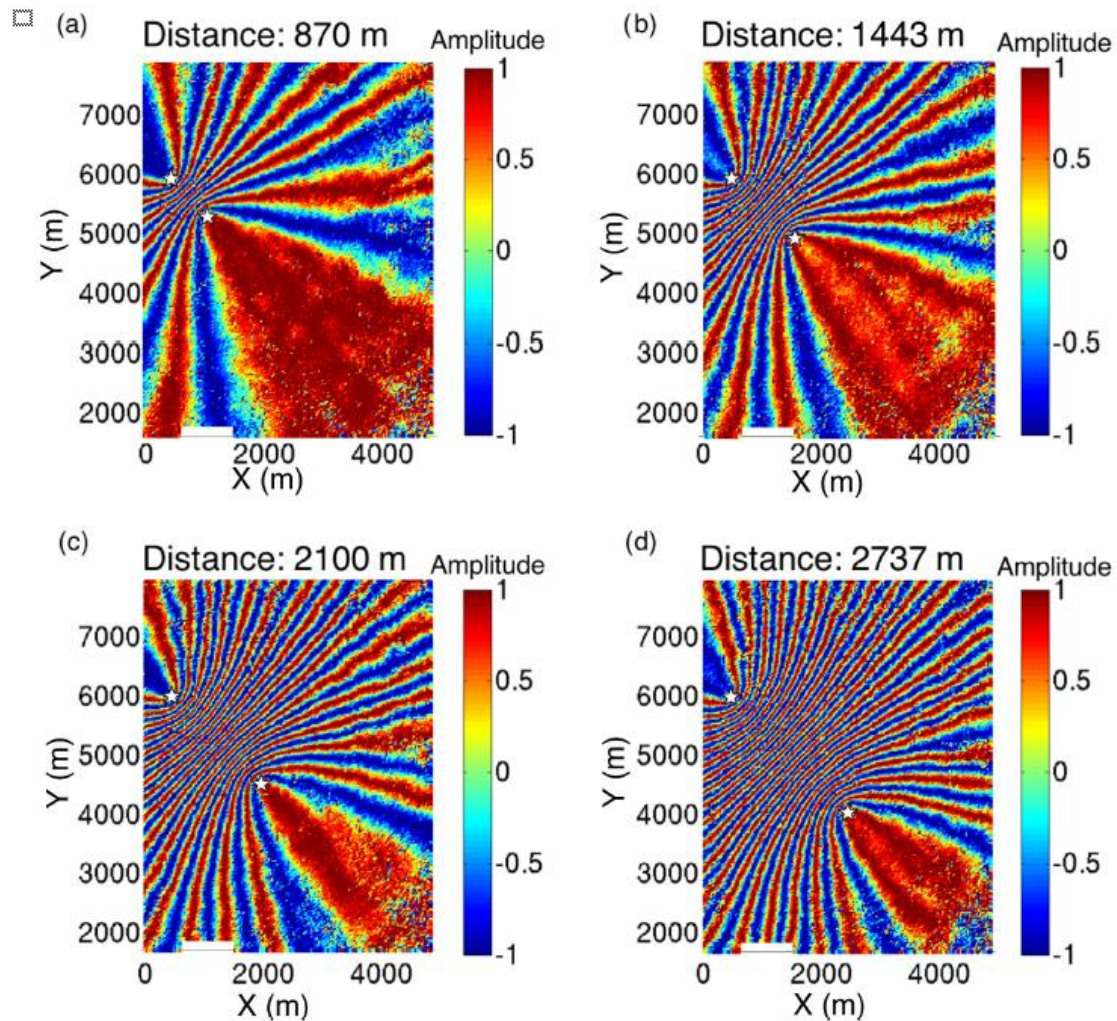
et un traitement d'antenne adapté au bruit sismique ambiant (Fig. 3) pour produire une carte de vitesse de phase des ondes de surface avec une résolution spatiale jamais atteinte auparavant (Boue et al, 2014). C'est donc bien via les réseaux denses et des méthodes modernes de beamforming que nous continuerons à améliorer la résolution spatiale en tomographie sismique passive.



**Fig. 3 :** (Gauche) Sélection de stations sismiques du « Transportable Array (USArray) » sur la période nov. 2009 – janvier 2010. Deux sous-réseaux (en bleu) organisés autour de chaque station (rouge) sont utilisés pour extraire les ondes de surface (Love + Rayleigh) à partir de traitement d’antennes. Le rectangle blanc correspond à la zone sur laquelle l’inversion sismique haute résolution est produite. (Centre) Illustration du procédé de Double Formation de voies (DBF) entre deux sous-réseaux de 9 stations. Les vecteurs lenteurs ( $U_A$  et  $U_B$ ) sont associés aux angles de rotation azimutaux ( $\theta_A$  et  $\theta_B$ ) pour optimiser l’extraction des ondes de surface à partir du bruit sismique ambiant. (Droite) Carte des vitesses de phase obtenue par inversion des temps de propagation après DBF. Les zones à faible vitesse correspondent aux bassins sédimentaires. Celles à plus forte vitesse aux massifs montagneux (Boue et al, 2014).

D’autre part, la tomographie sismique peut aussi s’enrichir de l’utilisation des noyaux de sensibilité basés sur une approche de diffraction à fréquence finie qui va au-delà, en terme de résolution spatiale, de l’utilisation classique des tracés de rayons. Appliqué sur des réseaux denses à plus petites échelles (~quelques km), les noyaux de sensibilité pour les ondes de surface (Fig. 4) nous permettent de revisiter la tomographie sismique en vue d’applications majeures dans le domaine de l’exploration pétrolière (Chmiel et al, 2018).

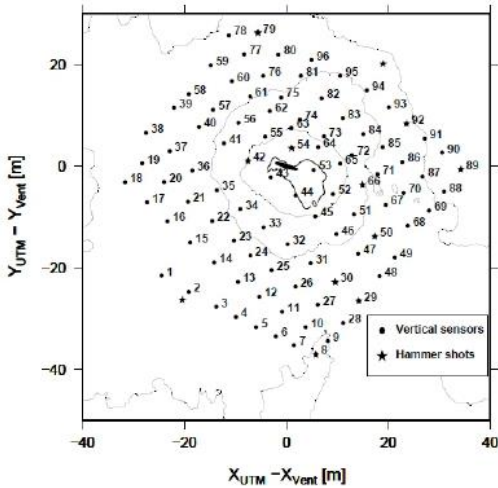
Une autre application potentielle du bruit ambiant via l’acquisition sur des réseaux sismiques denses est la localisation dynamique des sources de bruit ambiant. Prenons pour exemple le bruit généré par un geyser à quelques mètres sous la surface du sol : Old Faithfull, au coeur du Yellowstone National Park, ainsi nommé pour la régularité de ses éruptions (avec une période d’environ 40 minutes).



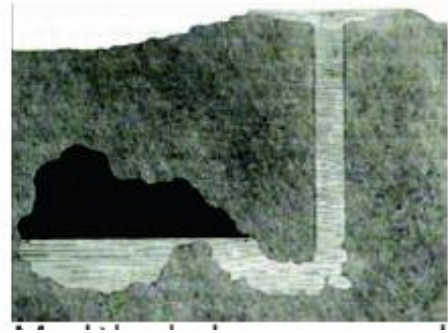
**Fig. 4 :** Noyaux de diffraction expérimentaux pour les ondes de surface obtenus par corrélation à  $F=4.2$  Hz pour deux récepteurs (étoiles) séparés de (a) 870 m, (b) 1443 m, (c) 2100 m et (d) 2737 m. Les noyaux de diffraction révèlent les moindres variations de vitesse du champ d'onde. L'acquisition est effectuée ici par la compagnie pétrolière CGG à partir d'un réseau sismique ultra-dense ( $\sim 50000$  géophones) avec un point de mesure tous les  $\delta x = \delta y = 30$  m (Chmiel et al, 2018).

En 1992, un réseau sismique de 96 stations avait été déployé autour du geyser (Fig. 5) pour en mesurer l'activité sismique. Les signaux enregistrés montraient une activité de trémor permanente, c'est-à-dire un bruit intense continu dont la modulation d'amplitude correspondait aux périodes d'éruption du geyser. En revisitant ces données de bruit sismique ambiant, vingt ans après, via l'utilisation d'algorithmes de traitement d'antennes (ou Matched Field Processing, qui s'apparente à un processus de corrélation sur des fenêtres de temps courtes), nous avons pu isoler et relocaliser les sources principales de bruit sismique et leur dynamique temporelle au cours du cycle d'éruption (Cros et al, 2012 ; Vandemeulebrouck et al, 2013). Il apparaît (1) que la source dominante de bruit vient du conduit du geyser avec une montée progressive de ce bruit d'ébullition au cours du cycle (Figs. 5c et d), et (2) qu'une zone de recharge est présente à côté du geyser comme cela est parfois décrit dans la littérature (Fig. 5b) pour ce type de phénomènes hydrothermaux.

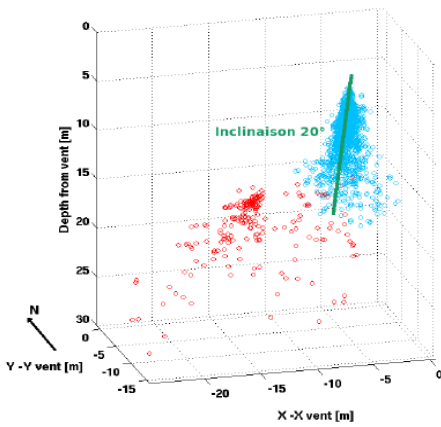




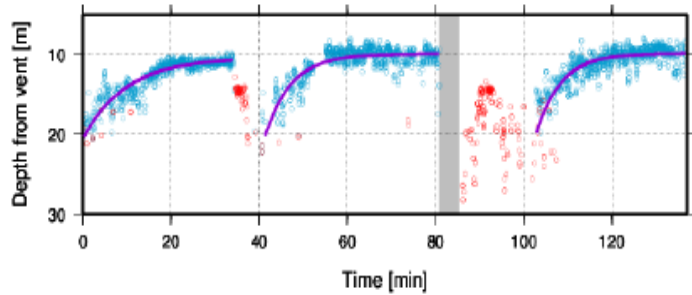
(a)



(b)



(c)



(d)

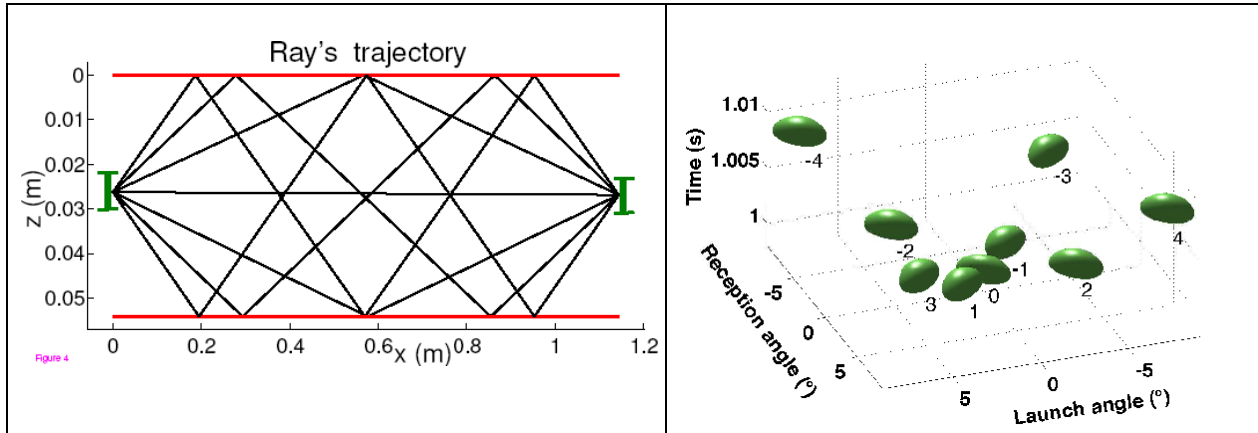
**Fig. 5:** Suivi temporel des sources de bruit sismique ambiant sur le geyser Old Faithfull, Yellowstone National Park, USA. (a) Répartition géographique sur une zone de 40 m x 40 m des 96 stations sismiques autour du conduit principal du geyser. (b) Modèle de la structure d'un geyser dit "bubble trap". (c) Répartition spatiale des sources de bruit sismique pendant deux cycles du geyser. Les sources du conduit principal sont en bleu, les sources dans la zone de recharge sont en rouge. Un angle de 20 degré est observé par rapport à la verticale pour le conduit principal. (d) Suivi dynamique (en profondeur sur ce graphe) des sources de bruit sismique ambiant. On notera: (1) la montée progressive au début du cycle jusqu'à une profondeur de 10 m environ et (2) l'activation de la zone de recharge à la fin du cycle d'éruption (Vandemeulebrouck et al, 2013).

## 2- Acoustique ultrasonore : tomographie en guide d'onde via un double traitement d'antenne.

Comment se présente l'utilisation de réseaux denses à l'échelle du laboratoire ? Quels progrès scientifiques permettent-ils de faire dans le domaine de la propagation d'ondes ?

L'utilisation conjuguée d'une antenne d'émetteurs et d'une antenne de récepteurs acoustiques de part et d'autre d'un guide d'onde permet de séparer les différentes arrivées propres à la propagation en milieu réverbérant via le traitement d'antenne en Double Beamforming (DBF) décrit plus haut.

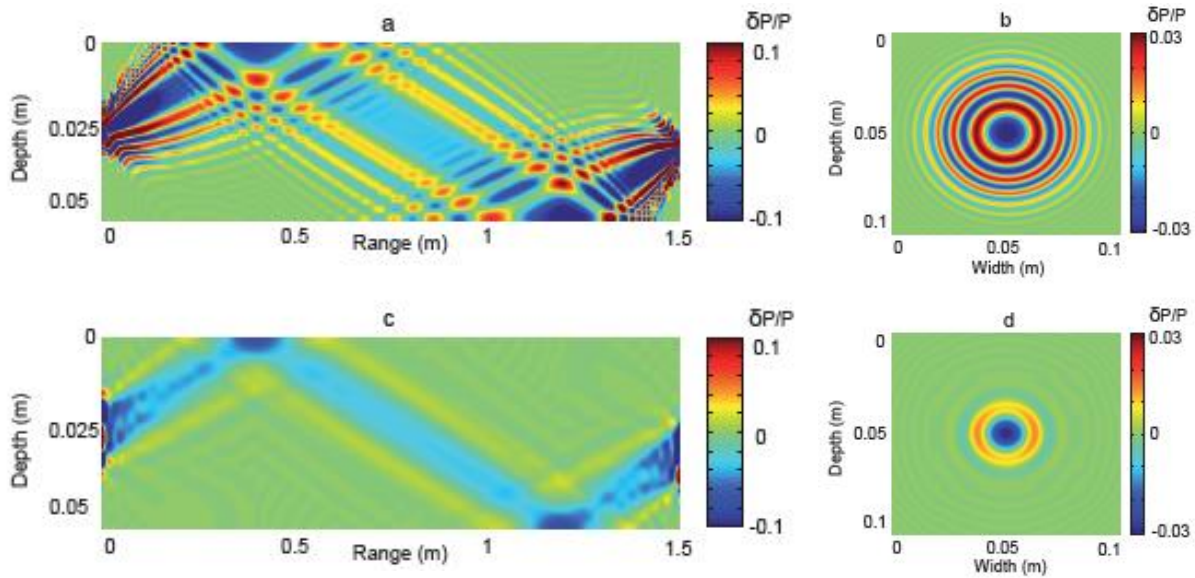
En transformant les données reçues de l'espace des positions à l'espace des angles (comme présenté sur la Fig. 6 pour des antennes linéaires verticaux d'éléments piézoélectriques qui couvrent l'ensemble de la colonne d'eau dans un guide d'onde ultrasonore de  $\sim 5$  cm de profondeur et  $\sim 1.2$  m de longueur), on autorise l'identification de chacun des maxima d'intensité du champ d'onde après DBF à des trajets acoustiques (ou rayon acoustique) se propageant entre les deux antennes (Roux et al, 2008 ; Le Touze et al, 2010).



**Fig. 6 :** (Gauche) Représentation schématique du guide d'onde ultrasonore matérialisé par les deux interfaces rouges et des rayons acoustiques reliant le centre du réseau émetteur (à gauche) au centre du réseau récepteur (à droite). (Droite) Représentation des maxima d'intensité (données expérimentales à 1 MHz) dans l'espace 3D [angle émission, angle réception, temps] de chaque rayon acoustique après DBF. Chaque « beam » est numéroté en fonction du nombre total de réflexions sur les interfaces, le signe + ou – correspondant à une première réflexion sur le fond ou la surface du guide d'onde (Le Touze et al., 2010).

L'avantage de ces multiples rayons acoustiques tracés entre chaque sous-antenne émetteur-récepteur (formé d'une dizaine d'éléments piézoélectriques) est qu'ils traversent largement le guide d'onde selon les axes  $x$  et  $y$  (longueur et profondeur) en apportant pour chacun d'entre eux une information en temps, amplitude et angle sur chacun des « pixels » acoustiques traversés. En pratique, plus de 2000 rayons sont identifiables dans la configuration expérimentale de la Figure 6 et on peut imaginer réaliser une inversion tomographique dans le guide d'onde associée à une perturbation locale de densité ou de vitesse sur la base de l'ensemble de ces rayons acoustiques. En pratique, on a cherché à combiner le DBF avec la physique des noyaux de sensibilité pour relier les variations de temps, d'amplitude ou d'angles de chaque « beam » (ou faisceau acoustique) aux paramètres physiques de la fluctuation : changement local de densité (une cible dans l'eau), perturbation locale de la vitesse (une plume de température montant du fond du guide d'onde) ou encore modification locale de l'interface eau-air (une vague à la surface).

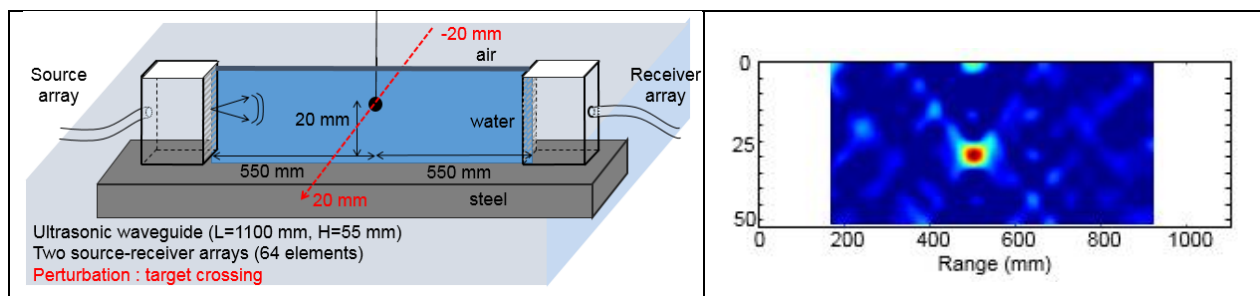
A la différence des rayons acoustiques (approximation géométrique ou haute fréquence), les noyaux de sensibilité appliqués aux « beam » acoustiques permettent d'intégrer les effets de diffraction liés à la bande passante limitée des transducteurs piézo-électriques (Fig. 7). Cette physique n'est pas nouvelle et fut d'abord développée dans le contexte de l'imagerie géophysique de proche surface (Dalhen et al, 2000), mais sa généralisation aux observables amplitudes/temps/angles propres à l'acoustique en milieu réverbérant (guide d'onde) est une nouveauté (Marandet et al, 2011 ; Aulanier et al, 2013).



**Fig. 7 :** Représentation du noyau de sensibilité de l'amplitude d'un « beam » acoustique à 3 MHz pour un trajet effectuant une réflexion à la surface et une au fond du guide d'onde. Coupe longitudinale (a) et transversale (b) dans le plan de propagation pour des antennes émetteurs-récepteurs formés de 3 éléments. (c) et (d) Même chose pour deux antennes émetteurs-récepteurs formés de 21 éléments (Marandet et al, 2011)

Ces travaux nous ont amenés à effectuer trois types d'inversion dans les guides d'ondes ultrasonores:

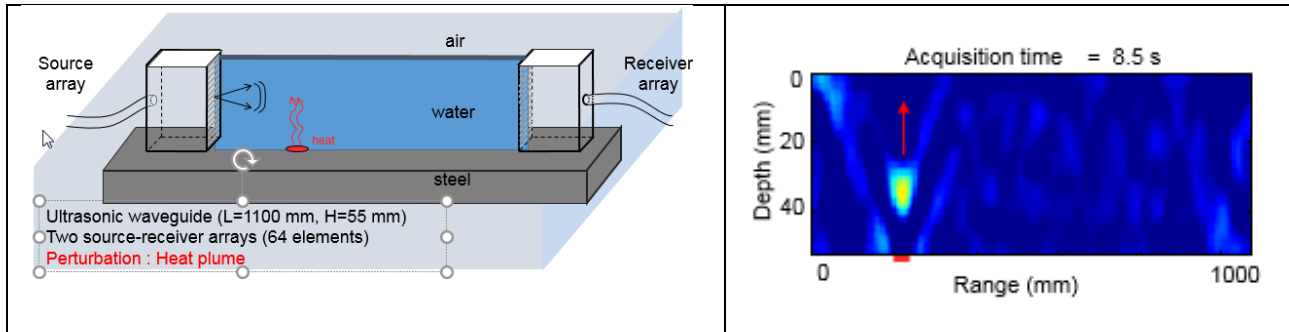
- (1) la détection/localisation d'une cible de taille comparable à la longueur d'onde dans un environnement de type portuaire (Marandet et al, 2011), comme représenté sur la Fig. 8,
- (2) l'imagerie d'une plume de chaleur (Roux et al, 2011), observée durant la montée d'un panache de convection depuis le fond du guide d'onde (Fig. 9).
- (3) l'inversion d'une perturbation locale de la surface du guide d'onde (Roux et Barbara, 2014) due au passage d'une vague à la surface du guide d'onde (Fig. 10).



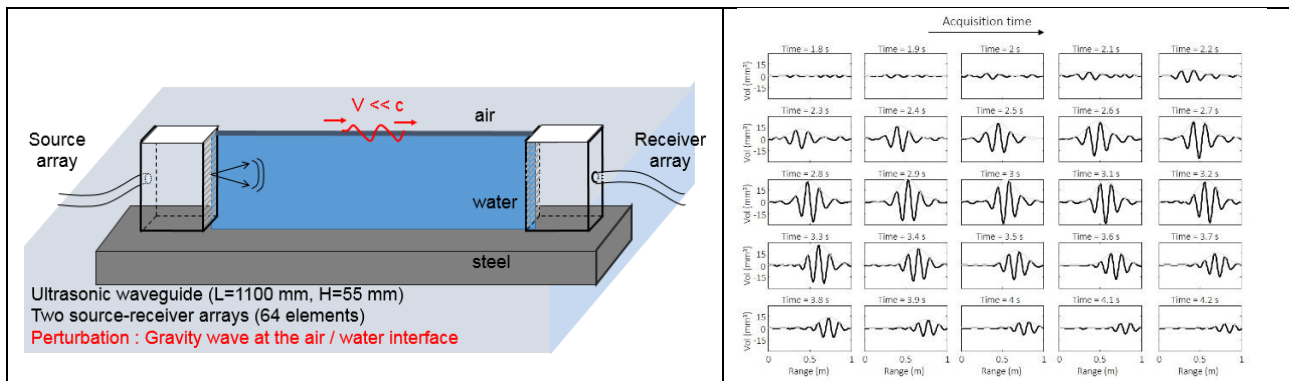
**Fig. 8 :** (Gauche) Représentation schématique du guide d'onde avec les longueurs caractéristiques. (Droite) Détection et localisation d'une cible sphérique en plomb de diamètre  $a$  pour un produit  $ka \sim 20$  (longueur d'onde 0.5 mm) dans un guide d'onde ultrasonore de longueur 1100 mm et de profondeur 52 mm, délimité par deux antennes de transducteurs émetteurs-récepteurs qui couvrent toute la hauteur du guide. L'échelle de couleur représente la probabilité de présence de la cible (Marandet et al, 2011) quand la bille se trouve au centre du guide.

L'ensemble de ces travaux furent menés en collaboration étroite avec le GIPSA-Lab (INP, Grenoble) dans le cadre de l'ANR Jeune Chercheur TOTS (2010-2013), portée par Barbara Nicolas. Deux bourses de thèse financées par la Direction Général de l'Armement (DGA) nous ont permis

de former des étudiants sur ces problèmes physiques liant acoustique ultrasonore et traitement du signal.



**Fig. 9 :** (Gauche) Représentation schématique du guide d’onde avec les longueurs caractéristiques. (Droite) Inversion tomographique à partir des temps des « beam » acoustiques pour une plume de convection thermique initiée à la base du guide d’onde ultrasonore (point rouge). A 8.5s après le déclenchement de la convection, on observe clairement la montée du panache depuis le fond du guide d’onde vers la surface (Roux et al, 2011).



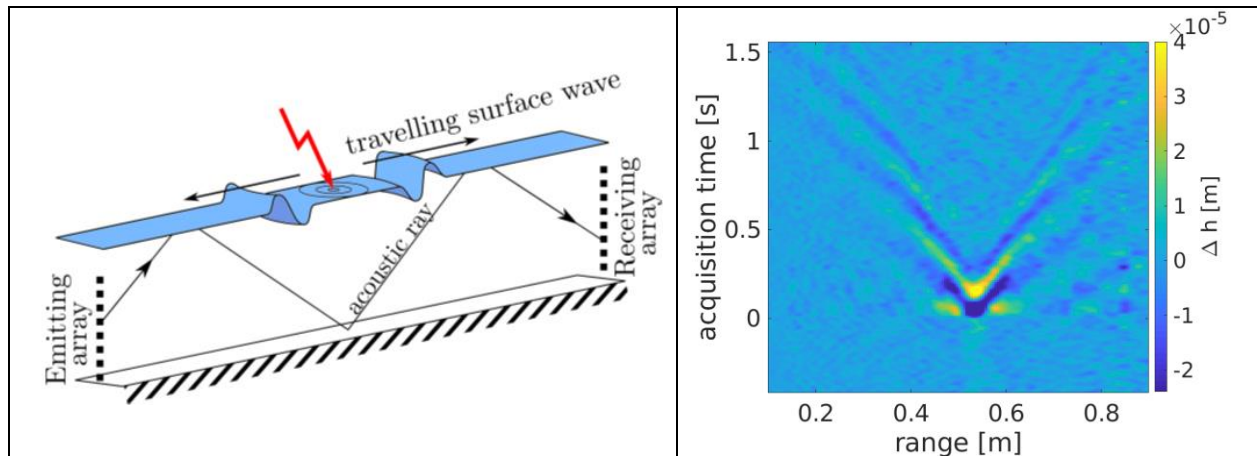
**Fig. 10 :** (Gauche) Représentation schématique du guide d’onde avec les longueurs caractéristiques. A noter que la vitesse de la vague en surface ( $V \sim 0.4$  m/s) est très petite devant la vitesse des ondes ultrasonores dans l’eau ( $c \sim 1500$  m/s). (Droite) Représentation spatio-temporelle de la déformation de surface au cours de la propagation d’une vague traversant le plan émetteur-récepteur. L’axe des abscisses correspond à la distance entre les antennes émetteur-récepteur. Chaque panel correspond à l’inversion de la surface du guide d’onde produite à partir d’une des 500 acquisitions acoustiques effectuées dans le guide d’onde. Les inversions sont produites à partir des variations d’amplitude des « beam » acoustiques sous l’influence de la déformation de la surface du guide (Roux et Barbara, JASA, 2014).

Pour la DGA, la finalité de ces travaux de recherche est la mise au point d’une approche méthodologique à base d’antennes émetteurs-récepteurs qui permette l’inversion d’une perturbation de taille et de caractéristique quelconque dans les chenaux acoustiques sous-marins. En pratique, l’enjeu militaire se situe dans le domaine de la protection portuaire avec la détection/localisation de plongeurs ou de mini sous-marins téléguidés (Automated Underwater Vehicle, AUV).

**Pour la sécurité nationale, la question est : comment protéger les rades de Brest ou de Toulon contre des attaques terroristes quand tous les systèmes sonar classique voient leur efficacité fortement diminuée dans les environnements réverbérant pour les ondes acoustiques ?**



Les derniers développements sur ce thème de recherche ont trait à la nature des observables utilisées pour l'inversion d'une perturbation dans le guide d'onde. En effet, si les variations de temps puis d'amplitude des « beam » acoustiques ont été utilisés jusque-là grâce aux noyaux de sensibilité (Figs. 8-10), la variation des angles d'émission et de réception de chacun de ces « beam » n'avait pas encore été exploitée. C'est dorénavant chose faite pour une perturbation générée à la surface du guide d'onde par un choc laser et le résultat d'inversion est très spectaculaire (Fig. 11).



**Fig. 11 :** (Gauche) Représentation schématique du guide d'onde avec l'impact du shot laser au centre de celui-ci (flèche rouge). (Droite) Résultat de l'inversion de la surface du guide d'onde en utilisant à la fois des angles d'émission et des angles de réception d'une collection de 2285 « beam » acoustiques. L'axe des abscisses est la longueur du guide d'ondes; l'axe des y est le temps par rapport au shot laser générant l'onde de surface gravito-capillaire. L'échelle de couleur correspond à la déformation de la surface en mètre.

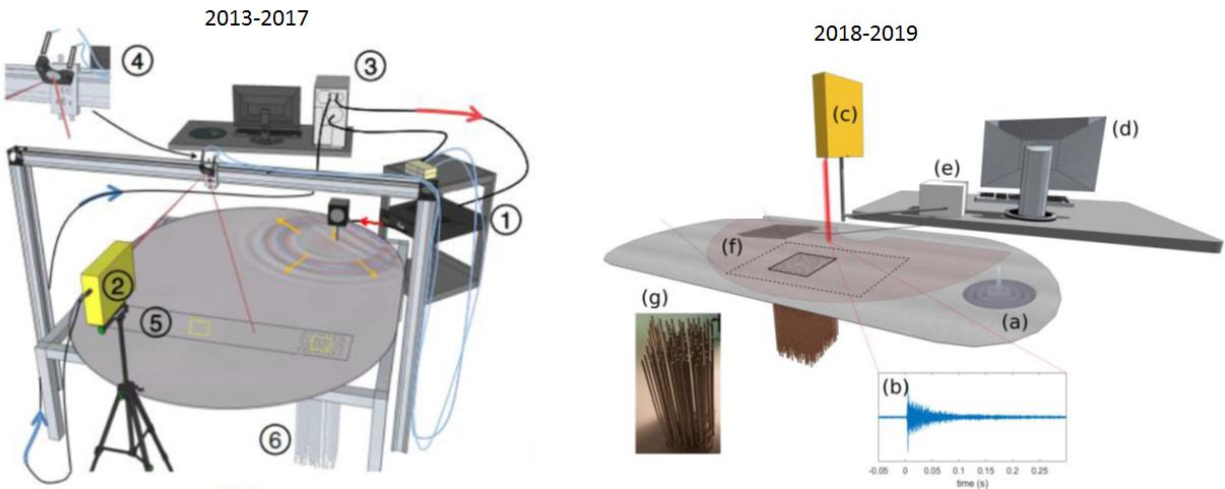
De façon surprenante, on constate que l'inversion de la perturbation de surface est beaucoup plus propre (moins de fantôme, meilleure résolution spatiale) avec l'utilisation des variables angles en lieu et place des variables temps ou amplitude. Cette constatation amène à des conclusions intéressantes et fondamentales dans le domaine de la tomographie acoustique. En effet, la tomographie s'est toujours intéressée au temps de trajet (ou à la variation du temps de trajet) d'une onde pour obtenir la carte de vitesse (ou à ses fluctuations) du milieu de propagation. Pour obtenir une bonne mesure du temps, il faut une synchronisation parfaite entre la source et le récepteur. Ce qui est facile à l'échelle ultrasonore en laboratoire devient alors très complexe et très onéreux à mettre en œuvre dans l'océan où plusieurs milliers de kilomètres séparent émetteurs et récepteurs dans les rares tentatives de tomographie acoustique à cette échelle (voir plus d'infos générales sur le site wikipedia [https://en.wikipedia.org/wiki/Ocean\\_acoustic\\_tomography](https://en.wikipedia.org/wiki/Ocean_acoustic_tomography)). Montrer, comme sur la Figure 11, que la même tomographie peut être obtenue par la variation d'angle des rayons acoustiques plutôt que par leur variation de temps de trajet signifie que seule la synchronisation locale de chaque élément des antennes émettrices/réceptrices est nécessaire et non plus la synchronisation complète entre les deux antennes.

**A n'en point douter, ce changement majeur de paradigme amènera dans le futur à de nouvelles expérimentations tomographiques à grande échelle avec pour objectif la mesure précise des variations spatiales et temporelles de la température des couches superficielles dans l'océan qui sont autant d'indicateurs des changements climatiques en cours.** Il est à noter que la transposition à l'échelle réelle d'un guide d'onde océanique de ces résultats expérimentaux effectués à l'échelle ultrasonore fut déjà l'objet d'une publication (Roux et al, 2013).

Mon travail en acoustique sous-marine a été récompensé en 2013 par la « Medwin Prize in Acoustical Oceanography » attribuée par l'Acoustical Society of America.

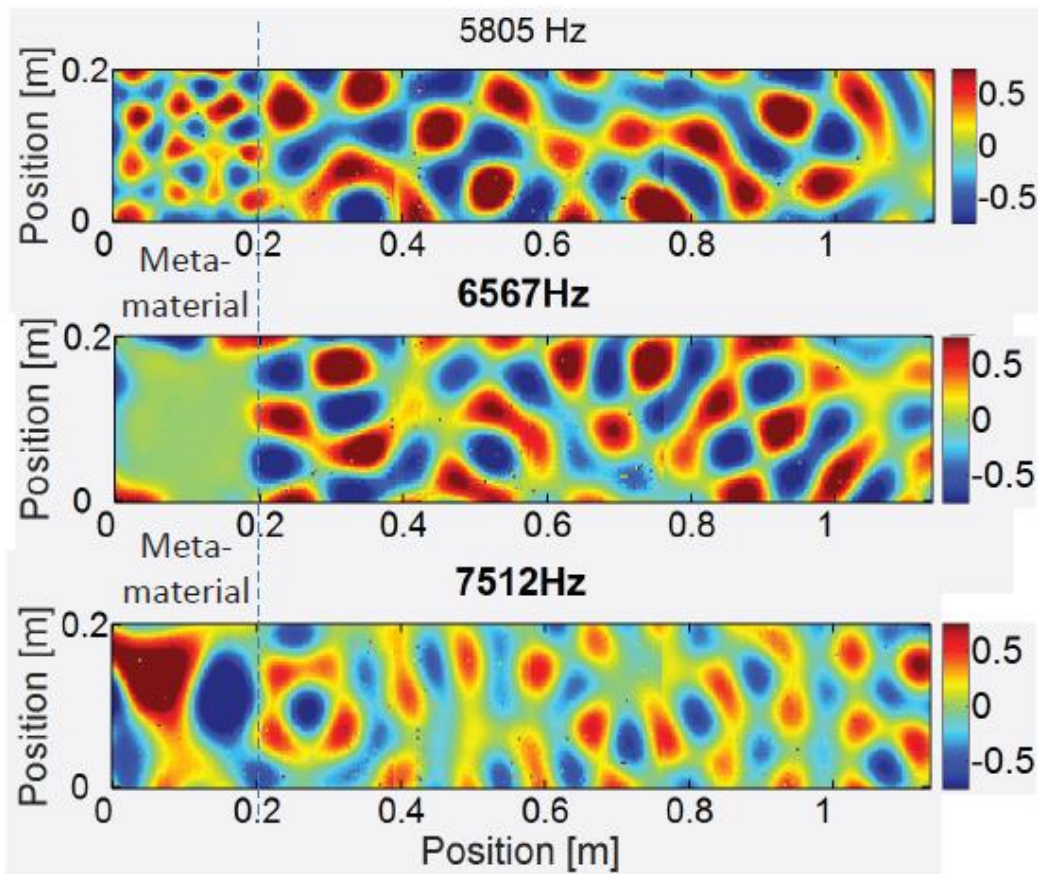
### 3- Les métamatériaux résonants sub-longueur d'onde : une approche expérimentale originale menée à l'échelle du laboratoire et à l'échelle géophysique.

Ce travail concerne l'étude expérimentale et numérique de l'effet de résonateurs uni-axiaux sub-longueur d'onde, sur la propagation d'ondes élastiques de flexion dans une plaque mince d'aluminium (mode de Lamb A0). Les résonateurs consistent en de simples tiges d'aluminium collées sur la plaque (voir Fig. 12 pour la description et l'évolution du dispositif expérimental). Ils tirent leur caractère sub-longueur d'onde, du ratio important entre leurs dimensions (longueur/diamètre) atteignant presque deux décades. Lorsqu'on les arrange (périodiquement ou non) sur une échelle sub-longueur d'onde, on obtient un milieu localement résonant qui se comporte comme un métamatériau. Dans les deux configurations expérimentales de la Fig. 12, les degrés de liberté qu'offre ce métamatériau sur le contrôle du champ d'ondes, sont grands. D'une part, le milieu de propagation est une plaque qui, dans la gamme de fréquence étudiée, présente deux composantes: longitudinale (mode de Lamb S0) et transversale (mode de Lamb A0). D'autre part, les résonateurs présentent à la fois des résonances de flexion (en lien avec la composante S0 dans la plaque) et de compression (excité par le mode de Lamb A0). Le métamatériau est constitué de 100 à 400 tiges qui peuvent être organisées spatialement de façon ordonnées ou désordonnées.



**Fig. 12 :** (Gauche) Dispositif expérimental pour les premières expériences sur les métamatériaux en laboratoire à partir de 2013. Un vibromètre (1) génère une onde de Lamb A0 dans la plaque d'aluminium. Le champ d'onde est mesuré par un vélocimètre Doppler (2) dont le point de mesure est déplacé sur la face supérieure de la plaque en chaque point de la surface rectangulaire (5) et contrôlé par un PC et un jeu de deux miroirs motorisés. Le métamatériau (6) est fixé sur la face inférieure de celle-ci (Rupin et al, 2014 & 2015). (Droite) Evolution du dispositif expérimental à partir de 2018. La source est un élément piézoélectrique (a) collé à la plaque. Le vélocimètre Doppler (c) est maintenant connecté à un bras de robot motorisé (e) commandé par PC (d), ce qui permet une plus grande surface d'analyse (Lott and Roux, 2019a). Dans les deux montages expérimentaux, le métamatériau (a) est composé de 100 à 400 tiges verticales en aluminium qui sont collées sur la face inférieure de la plaque (g). Le signal enregistré (b) est fortement dispersé en raison de la faible atténuation intrinsèque de la plaque. La dispersion temporelle en réponse à un pulse court excède 0.2s, ce qui correspond à plus de 20 allers-retours dans la plaque.

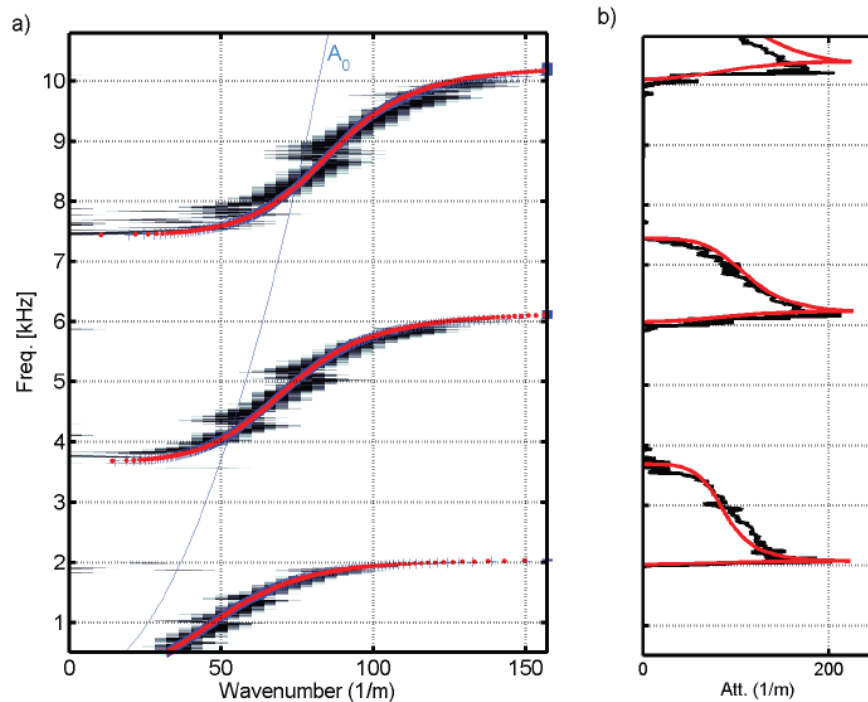
L'originalité de la manip, outre sa dimension mésoscopique assez inhabituelle dans le domaine des métamatériaux, tient dans la cartographie du champ d'onde sur une grande surface incluant le métamatériau, grâce à l'acquisition séquentielle de l'ensemble des réponses impulsionnelles, à l'aide d'un vélocimètre laser (Fig. 12). L'analyse des données révèle la présence de trois larges bandes fréquentielles interdites, qui commencent à l'emplacement des résonances de compression de chaque tige (Fig. 13b & Fig. 14). Nous avons testé un arrangement, à la fois périodique et aléatoire, des résonateurs et les résultats sont tout à fait identiques. Les bandes interdites sont donc liées à la nature résonante de la cellule élémentaire du métamatériau, et non à son caractère périodique (diffraction de Bragg). D'autre part, nous avons également mis en évidence des vitesses apparentes inférieures ou supérieures à celle mesurées dans la plaque nue pour les fréquences situées en bordure de bande interdite (Fig. 14).



**Fig. 13 :** Représentation spatiale de la vitesse normale du champ mesurée expérimentalement sur la plaque (zone rectangulaire délimitée sur la Fig. 9). La zone couverte par le métamatériau (formé de 10 x 10 tiges verticales) est placée sur la gauche entre 0 et 0.2 m. Le champ d'onde pour le mode A0 est présenté à trois fréquences : (en haut) juste avant une bande interdite, (au milieu) au sein d'une bande interdite, (en bas) juste après une bande interdite. Avant et après la bande interdite, les vitesses apparentes (mesurée à partir des longueurs d'onde extraites de la figure de speckle au sein du métamatériau) sont plus lentes ou plus rapides que dans la plaque nue (Williams et al, 2015).

Une vision globale de l'ensemble de ces phénomènes d'interférence est obtenue via la détermination de la relation de dispersion au sein du métamatériau (Fig. 14). On constate alors une profonde modification de la courbe de dispersion du mode A0, avec des bandes passantes (ou bandes propagatives) qui sont le fruit des effets de répulsion (appelés « hybridations ») liés

essentiellement aux résonances de compression. Nous montrons également que le théorème de Bloch permet une excellente modélisation de la relation de dispersion dans toute sa complexité (Williams et al, 2015).

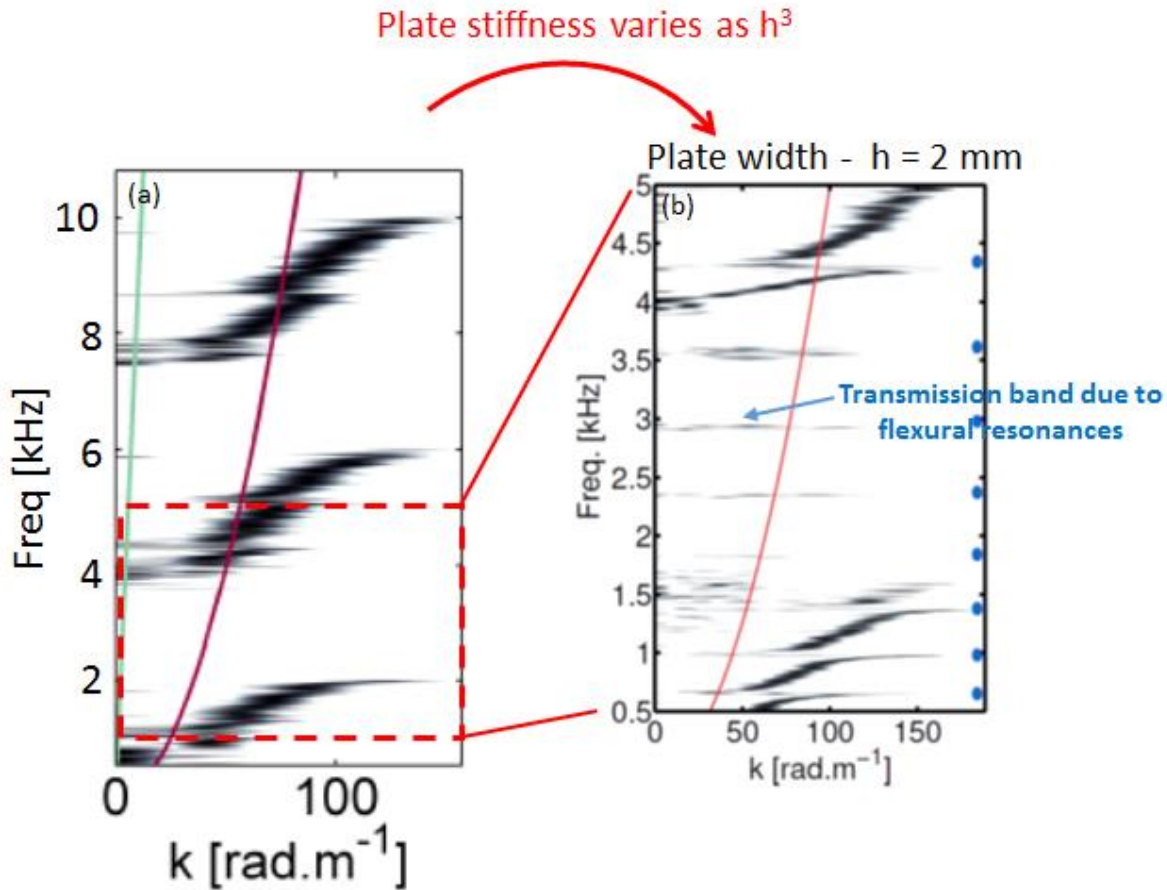


**Fig. 14 :** Comparaison entre les relations de dispersion expérimentales et théoriques au sein du métamatériau. (a) Le nombre d’onde correspondant à la partie propagative du champ est en noir, avec la relation de dispersion issue d’un calcul numérique (rouge). On distingue clairement deux hybridations (avec la branche liante et la branche anti-liante de part et d’autres de la résonance) qui ouvrent chacune une bande interdite. (b) L’atténuation mesurée au sein du métamatériau dans les bandes interdites est représentée en noir, à comparer avec la prédiction numérique (rouge). L’accord entre résultats expérimental et numérique est excellent (Williams et al, 2015).

Dans un autre aspect de ce travail, nous avons eu recours à la modélisation numérique par éléments finis, via le code numérique SpecFem3D, pour mieux appréhender la complexité de ce métamatériau élastique. Nous avons commencé par montrer que la propagation d’ondes au sein de ce type de métamatériau peut s’approximer par un système 1D (poutre support + résonateurs), moins coûteux en termes de ressource calcul. Nous avons alors pu nous intéresser aux hybridations induites par chacune des 2 types de résonances des tiges, flexion et compression, indépendamment l’une de l’autre (Colquitt et al, 2017). Cela nous a permis d’établir le caractère singulier des métamatériaux élastiques. En effet, les résonances de flexion des tiges entraînent un transfert énergétique entre la composante transversale du champ d’ondes dans la plaque ( $A_0$ ) (qui est la seule initialement excitée) et la composante longitudinale ( $S_0$ ).

Du point de vue de la relation de dispersion, cela se traduit par une hybridation particulière, qui fait apparaître un troisième mode de propagation. Cette hybridation rend compte du couplage entre les modes  $A_0$  et  $S_0$  dans la plaque du fait des résonances de flexion. Elle est d’autant plus apparent que la plaque est fine (et donc flexible), et se manifeste sur la Figure 15 par l’apparition de bandes de transmission ou de bandes interdites très étroites associées aux résonances de flexion (Lott & Roux, 2019b).



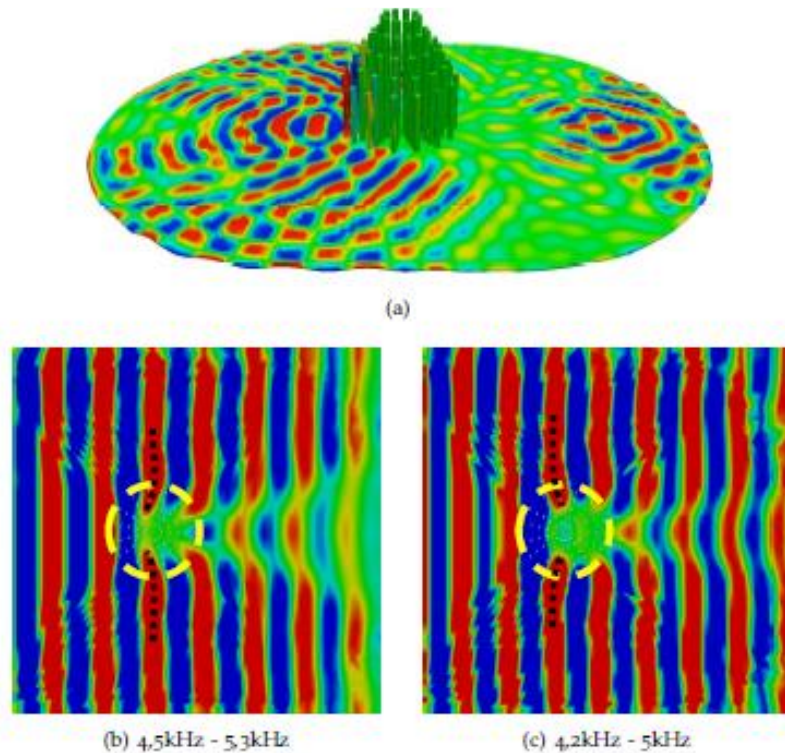


**Fig. 15 :** Influence de la rigidité de la plaque sur l'accouplement entre les tiges et la plaque aux résonances de flexion. (a) Courbe de dispersion obtenue expérimentalement avec  $h =$  plaque de 6 mm de largeur. (b) Comme pour (a), avec une plaque de  $h = 2$  mm de largeur sur une partie restreinte du spectre de fréquences (carré rouge en pointillés en (a)). Pour la plaque plus mince, le système plaque plus tige montre une interaction plus forte avec les résonances de flexion des tiges (points bleus), à l'intérieur et à l'extérieur de la bande interdite.

**En conclusion, la relation de dispersion obtenue dans ces milieux localement résonants élastiques est dominée par les effets d'hybridation dus aux résonances de compression des tiges au sein du métamatériau.** Cependant, une hybridation sur la composante longitudinale du champ est également à l'oeuvre, du fait des résonances de flexion. Enfin, nous avons pu tester un certain nombre de configurations 1D (poutre support + résonateurs sub-longueur d'onde), qui ont montré la grande richesse des configurations envisageables avec cet ensemble poutre + tiges. En particulier, nous avons observé qu'un raidissement de la plaque (Fig. 15), obtenu par l'augmentation de son épaisseur, entraîne des effets d'hybridations de moins en moins marquées pour les résonances de flexion. L'influence de l'espacement inter-résonateur montre la possibilité d'obtenir des vitesses de groupe négatives, liées à l'hybridation par les résonances de flexion. Cela confirme l'intérêt de ce type de métamatériaux pour des applications de type cape d'invisibilité.

Actuellement, nous cherchons à obtenir ce type de cape d'invisibilité (ou « cloaking ») pour les ondes de Lamb. Nous avons lancé le développement d'un algorithme basé sur la minimisation (au sens des moindres carrés) de l'écart entre le champ d'ondes observé dans la plaque nue (sans obstacle ni métamatériau) avec celui observé lorsqu'on ajoute un obstacle entouré du

métamatériau. Les paramètres utilisés pour la minimisation sont la longueur des tiges et leur espacement. La disposition générale des résonateurs respecte celle utilisée récemment avec ce même type d'ondes par Farhat et al. (2009). Un exemple de configuration avec des résonateurs de différentes longueurs, est donné sur la Figure 16. Elle montre qu'il est possible d'obtenir un ralentissement ou une accélération des ondes de Lamb A0 selon la bande passante que l'on sélectionne. On remarque que la figure de diffraction vers l'avant est moins marquée dans le cas où les ondes voyagent plus vite dans le métamatériau. Ici, l'obtention d'un véritable effet de « cloaking » nécessite l'obtention d'une anisotropie effective sur la vitesse de propagation de l'onde de Lamb A0 (Colombi et al, 2015, 2016a).

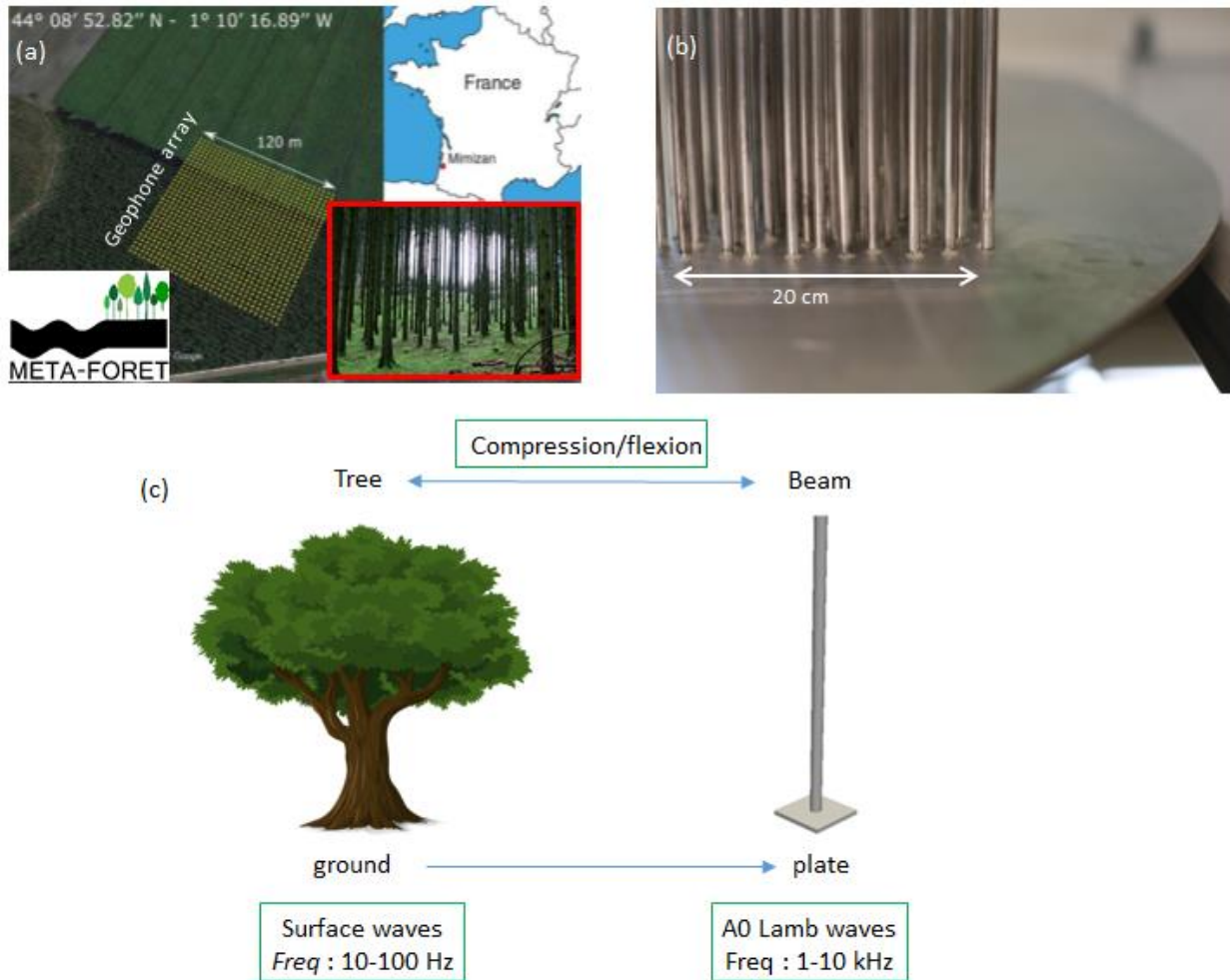


**Fig. 16 :** Illustration des travaux en cours pour la mise au point d'une cape d'invisibilité pour les ondes de Lamb A0. (a) Exemple de configuration étudiée : un ensemble de tiges de différentes longueurs sont disposées en étoile. (b) et (c) Allure du champ d'ondes (composante verticale) au sein du métamatériau (matérialisé par les cercles jaunes) dans deux gammes de fréquences différentes. Le ralentissement (gauche) ou l'accélération (droite) des ondes est manifeste, ce dernier donnant lieu à une meilleure reconstruction du champ diffracté vers l'avant.

La généralisation de ces phénomènes physiques à l'échelle géophysique, où la plaque devient alors un sol modélisable comme un milieu semi-infini, montrerait alors que les ondes de Rayleigh (ondes de surface) subissent le même effet quand elles interagissent avec une forêt constituée d'arbres de 20 m de hauteur et espacés tous les 3 ou 4 m (Colombi et al, 2016a), ouvrant des possibilités nouvelles dans le domaine de la protection sismique (Fig. 17).

C'est le but du projet METAFORÉ ( <https://metaforet.osug.fr/> ) qui fut lauréat d'une ANR « Défi de tous les savoirs » en 2016. En effet, le constat qui fut à l'origine du projet METAFORÉ est le suivant : pourquoi la physique des ondes présente-t-elle peu d'expériences de physique complexe à grande échelle? Les ondes obéissant généralement à la même équation de propagation,

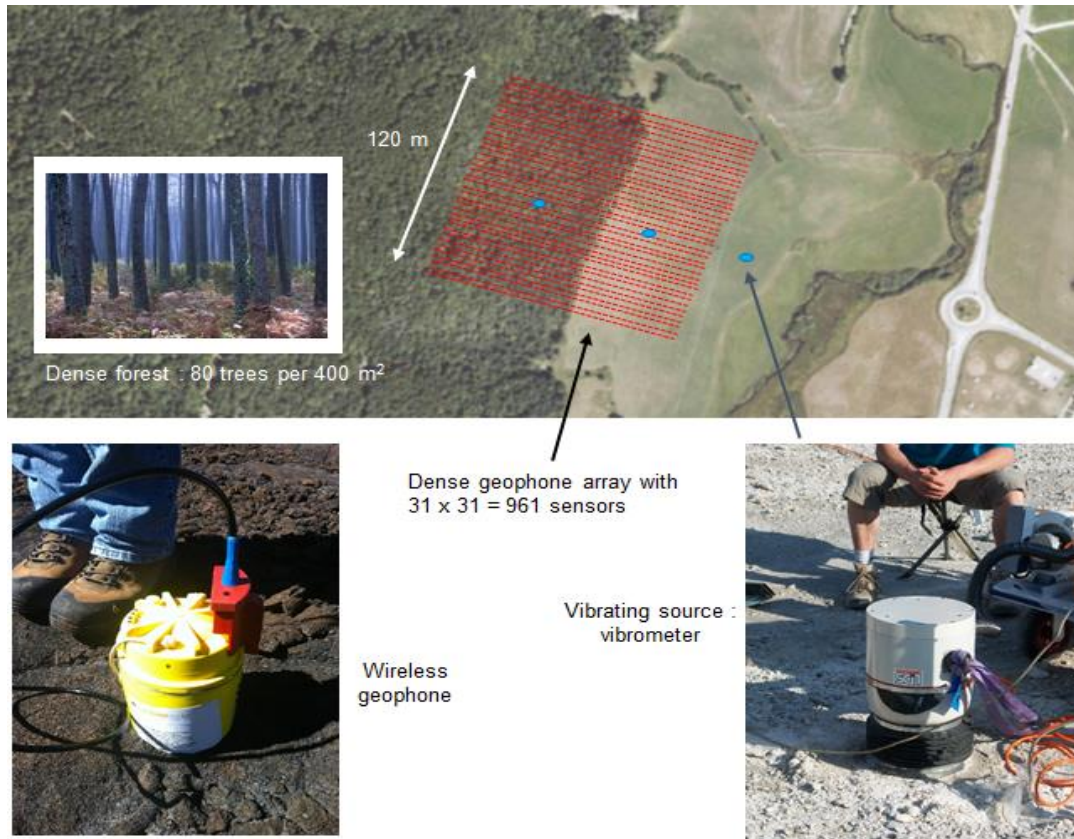
pourquoi observe-t-on rarement de phénomènes de physique ondulatoire à l'échelle géophysique, par exemple? Bien sûr, ce qui semble facile en environnement contrôlé à l'échelle du laboratoire peut s'avérer très pénible à mettre en place à grande échelle où il est parfois impossible de déployer un grand nombre de capteurs autonomes.



**Fig. 17 :** Exemples de métamatériaux localement résonants à différentes échelles pour les ondes sismo-élastiques. (a) Déploiement sismique de ~1000 géophones (point jaune) du côté de Mimizan (Landes) à l'interface entre un champ libre et une forêt dense de pins. (b) A l'échelle du laboratoire, surface couverte par une disposition aléatoire de tiges métalliques verticales collées sur une mince plaque d'aluminium. (c) Similitudes mécaniques de la cellule résonante unitaire pour les deux systèmes, avec leurs bandes de fréquences respectives (Lott et al, 2019).

Depuis quelques années, cependant, les sciences de la terre, et notamment la géophysique, vivent une révolution technologique avec la multiplication d'acquisitions sur de très denses réseaux de sismomètres, incluant parfois plus de dix mille capteurs. Ces campagnes sismiques restaient encore récemment l'apanage de riches compagnies pétrolières. Mais les choses évoluent et le coût financier de ces acquisitions devient maintenant abordable pour la recherche académique. En anticipant un peu, nous sommes même prêts d'un point critique où l'excellence des données géophysiques dépassera notre compréhension des phénomènes physiques sous-jacents.





**Figure 18:** En haut : Configuration de l'expérience META-FORET (Oct. 2016). L'objectif fut d'installer 961 géophones à trois composantes sur une grille de 120 m × 120 m avec un espacement de 4 m entre les éléments. Le réseau sismique (rouge) est placé à l'interface d'un champ ouvert et d'une forêt dense de pins (80 arbres par 400 m<sup>2</sup>). En bas à gauche : L'enregistrement continu du bruit ambiant fut effectué pendant 12 jours avec les capteurs sismiques sans fil de FairFieldNodal. En bas à droite : En plus de ce bruit ambiant, les signaux de la source active furent enregistrés à l'aide d'un vibromètre placé à différents endroits (en haut : ellipses bleues) dans le champ ouvert (à l'intérieur et à l'extérieur du réseau) et dans la forêt.

**Le projet METAFORÉT a pour but de combler ce manque avec une approche multidisciplinaires proposée par une équipe de physiciens, de géophysiciens et d'ingénieurs qui partagent un intérêt commun pour la propagation d'ondes en milieu complexe. Le but du projet est de réconcilier la physique ondulatoire complexe avec les observations à grande échelle.**

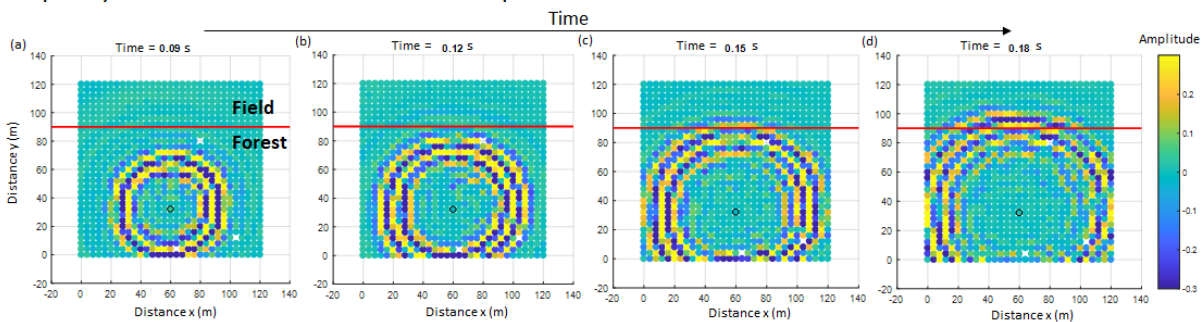
Plus précisément, nous souhaitons réaliser des expériences sur la physique des métamatériaux dans deux configurations propres à la géophysique (Fig. 18). Dans la première, nous avons montré qu'une forêt naturelle se comporte comme un métamatériau pour les ondes sismiques (Roux et al, 2017). L'idée est que chaque arbre de la forêt agit comme un résonateur qui piège une petite partie des ondes de surface sismiques. Le comportement collectif des arbres correspondrait alors à celui observé à toute petite échelle (millimètre) dans les métamatériaux optiques. Dans la seconde configuration expérimentale (à venir en 2020), nous montrerons qu'une distribution spatiale particulière de colonnes de béton enfouies, classiquement utilisées en ingénierie civile pour le compactage de sol, peut aussi se comporter comme une lentille sismique pour les ondes de



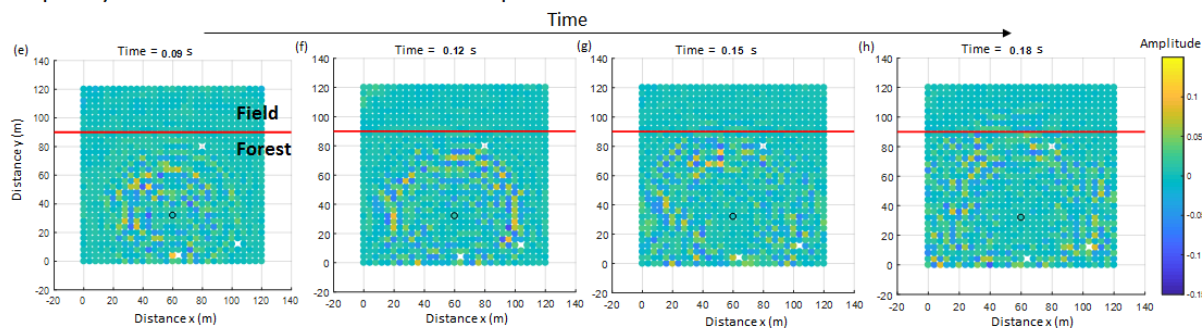
surface, avec pour effet de réfracter les ondes autour du centre de la lentille en laissant cette zone vierge de toute vibration sismique.

En parallèle avec des simulations numériques 3D (Colombi et al, 2016b, 2016c, 2017) et une approche théorique basée sur la géométrie conformationnelle (Farhat et al, 2009), le but premier du projet META-FORET est ainsi de réaliser deux expériences ambitieuses et novatrices où ~1000 capteurs sismiques déployés sur une surface d'environ un hectare auront pour finalité de mesurer le champ d'ondes sismiques dans les deux métamatériaux géophysiques proposés ci-dessus. Cette forte densité spatiale de capteurs est obligatoire pour mesurer précisément les courbes de dispersion (et donc la vitesse des ondes de surface) à l'intérieur comme à l'extérieur du métamatériau.

Frequency : 20 Hz - 50 Hz : below the tree compressional resonances



Frequency : 50 Hz - 80 Hz : above the tree compressional resonances



**Fig. 19 :** Expérience METAFORÉT 2016. (a)-(d) Représentation spatiale (x-y) du champ d'onde sismique mesuré sur le réseau sismique (composante verticale) pour une source à l'intérieur de la forêt en position (x=60 m, y=30 m) et affiché à quatre instants différents à partir de l'instant t=0 du tir sismique (de gauche à droite) (a) t=0,09 s ; (b) t=0,12 s ; (c) t=0,15 s ; (d) t=0,18 s. Le champ d'ondes sismiques a été filtré dans la bande des 20 Hz-50 Hz. Sur chaque image, la ligne rouge horizontale représente la limite forêt-champ. (e)-(f) Même représentation que ci-dessus pour le champ sismique filtré dans la bande de fréquences 50 Hz - 80 Hz. La partie basse fréquence du champ d'onde (<50 Hz) montre une onde de surface spatialement cohérente de grande amplitude alors que la partie haute fréquence (>50 Hz) présente une amplitude beaucoup plus faible (voir les différentes barres de couleurs dans les panneaux supérieurs et inférieurs) et montre une cohérence spatiale très réduite.

En pratique, deux types de source furent utilisées durant l'expérience de 2016: (1) le bruit sismique ambiant, probablement d'origine anthropique aux fréquences considérées (> 10 Hz) et (2) un signal source contrôlé et transmis au sol par un pot vibrant (Fig. 18). L'analyse de la dispersion des ondes au sein des deux métamatériaux (une forêt naturelle ou un chantier de compactage de sol par colonnes enfouies) nous permettra d'envisager de potentielles applications au « cloaking » sismique à haute fréquence en ingénierie civile (Fig. 19).

Je suis convaincu que ce projet présente des applications importantes en géophysique et en ingénierie civile à plus ou moins long terme. Par exemple, les bandes de fréquences interdites pourront être exploitées pour réduire le bruit sismique ambiant à des endroits où les vibrations du sol peuvent être un problème pour la qualité de mesures scientifiques de haute précision (vibrations locales de larges antennes astronomiques).

## Références principales

F. Aulanier, B. Nicolas, P. Roux, and J. Mars (2013), “Time-angle sensitivity kernels for sound-speed perturbations in a shallow ocean”, *Journal of the Acoustic Society of America*, 134(1), 88-96.

P. Boue, P. Roux, M. Campillo and X. Briand (2014), “Phase velocity tomography of surface waves using ambient noise cross-correlation and array processing”, *Journal of Geophysical Research*, 119, 519-529.

M. Campillo and A. Paul (2003), “Long-range correlations in the diffuse seismic coda”, *Science*, 299, 547-549.

M. Campillo and P. Roux (2014), “Seismic imaging and monitoring with ambient noise correlations”, *Treatise on Geophysics*, second Edition, Vol. 1, Edited by B. Romanowicz and A. Dziewonski, Elsevier-Amsterdam, 256-271.

J. Chaput, V. Clerc, M. Campillo, P. Roux and H. Knox (2016) , “On the practical convergence of coda-based correlations: A window optimization approach”, *Geophysical Journal International* 204 (2), 704-715.

M. Chmiel, P. Roux, P. Herrmann, B. Rondeleux, M. Wathelet (2018), “Data-based diffraction kernels for surface waves from convolution and correlation processes through active seismic interferometry”, *Geophysical Journal International*, 214 (2), 1468–1480.

A. Colombi, L. Boschi, P. Roux, and M. Campillo (2014), « Green's function retrieval through cross-correlations in a two-dimensional complex reverberating medium”, *Journal of the Acoustic Society of America*, 135 (3), 1034-1043.

A. Colombi, P. Roux, S. Guenneau, and M. Rupin (2015), « Directional cloaking of flexural waves in a plate with a locally resonant metamaterial”, *The Journal of the Acoustical Society of America* 137 (4), 1783-1789.

A. Colombi, P. Roux, S. Guenneau, P. Gueguen, and R. V. Craster (2016a), “Forests as a natural seismic metamaterial: Rayleigh wave bandgaps induced by local resonances”, *Scientific Reports* 6, 19238.

A. Colombi, D. Colquitt, P. Roux, S. Guenneau, and R. Craster (2016b), “A seismic metamaterial: The resonant metawedge”, *Scientific Reports* 6, 27717.

A. Colombi, S. Guenneau, P. Roux, and R. Craster (2016c), « Transformation seismology: composite soil lenses for steering surface elastic Rayleigh waves”, *Scientific Reports* 6, 25320.

A. Colombi, R. Craster, D. Colquitt, S. Guenneau, Y. Achaoui, P. Roux and M. Rupin (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*, section Mechanics of Materials, doi: 10.3389/fmech.2017.00010.

D. Colquitt, A. Colombi, R. Craster, P. Roux and S. Guéneau (2017), « Seismic metasurfaces: Sub-wavelength resonators and Rayleigh wave interaction”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 99, 379-393.

E. Cros, Ph. Roux, J. Vandemeulebrouck and S. Kedar (2011), "Locating hydrothermal acoustic sources at Old Faithful geyser using Matched-Field processing", *Geophys. J. Int.*, 187(1), 385-393.

- A. Derode, E. Larose, M. Tanter, J. De Rosny, A. Tourin, M. Campillo and M. Fink (2003), « Recovering the Green's function from the field-field correlations in an open scattering medium (L) », *J. Acoust. Soc. Am.*, 113, 2973-2976.
- F.A. Dahlen, S.H. Hung and G. Nolet (2000), "Fréchet kernels for finite-difference traveltimes – I. Theory", *Geophys. J. Int*, vol 141, pp.157-174.
- M. Farhat, S. Guenneau and S. Enoch (2009), *Phys. Rev. Lett.*, 103, 024301.
- S. Fried, K. Sabra, P. Roux, and W. A. Kuperman (2008), "Extracting the local Green's function on a horizontal array from ambient ocean noise", *J. Acoust. Soc. Am.*, 124 (4), Pages EL183-EL188.
- B. Froment, M. Campillo, P. Roux, P. Gouédard, A. Verdel and R. Weaver (2010), "Estimation of the effect of non-isotropically distributed energy on the apparent arrival time in correlations", *Geophysics*, 75 (5), SA85–SA93.
- S. W. Lani, K.G. Sabra, W.S. Hodgkiss, W. A. Kuperman and P. Roux (2013), "Coherent processing of shipping noise for ocean monitoring", *JASA Express Letters* 133, EL108-113.
- E. Larose, P. Roux, M. Campillo and A. Derode (2008), "Fluctuations of correlations and Green function reconstruction: role of scattering", *Journal of Applied Physics* 103, 114907.
- C. Leroy, S. Lani, K. Sabra, W. Hodgkiss, W. Kuperman, and P. Roux (2012), "Enhancing the emergence rate of coherent wavefronts from ocean ambient noise correlations using spatio-temporal filters", *J. Acoust. Soc. Am.*, 132 (2), 883-893.
- G. Le Touze, B. Nicolas, J. I. Mars, P. Roux and B. Oudompheng (2012), « Double-Capon and Double-MUSICAL for arrival separation and observable estimation in an acoustic waveguide" *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing* 2012:187.
- O. I. Lobkis and R. L. Weaver (2001), "On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field", *J. Acoust. Soc. Am.*, 110, 3011-3017.
- M. Lott and P. Roux (2019a), "Effective impedance of a locally resonant metasurface", *Phys. Rev. Materials* 3, 065202.
- M. Lott and P. Roux (2019b), "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*, Edited by Vicente Romero, ISTE Ltd.
- C. Marandet, P. Roux, B. Nicolas and J. Mars (2011), "Target detection and localization in shallow water: an experimental demonstration of the acoustic barrier problem at the laboratory scale", *J. Acoust. Soc. Am.* 129(1), 85-97.
- Roux, P., W.A. Kuperman, and the NPAL Group (2004), "Extracting coherent wavefronts from acoustic ambient noise in the ocean", *J. Acoust. Soc. Am.*, 116, pp. 1995-2003.
- P. Roux, B. D. Cornuelle, W.A. Kuperman and W.S. Hodgkiss (2008), "The structure of ray-like arrivals in a shallow water waveguide", *J. Acoust. Soc. Am.*, 124 (6), pp. 3430—3439.
- Roux, P. (2009), "Passive seismic imaging with directive ambient noise: Application to surface waves on the San Andreas Fault (SAF) in Parkfield", *Geophysical Journal International*, 179 (1), pp. 367-373.
- P. Roux, A. Roueff and M. Wathelet (2011), "The San Andreas Fault revisited through seismic-noise and surface-wave tomography", *Geophys. Res. Lett.*, 38, L13319.
- P. Roux, I. Iturbe, B. Nicolas, J. Virieux and J. Mars (2011), "Travel-time tomography in shallow water: Experimental demonstration at an ultrasonic scale", *J. Acoust. Soc. Am.*, 130(3), 1232-1241.

- P. Roux, W.A. Kuperman, B. D. Cornuelle, F. Aulanier, W.S. Hodgkiss and H.C. Song (2013), “Analyzing sound speed fluctuations in shallow water from group-velocity versus phase-velocity data representation”, *The Journal of the Acoustical Society of America* 133, pp. 1945-1952.
- P. Roux and B. Nicolas (2014), “Inverting for a deterministic surface gravity wave using the sensitivity-kernel approach” *Journal of the Acoustic Society of America*, 135(4), 1789-1799.
- P. Roux, L. Moreau, A. Lecointre, G. Hillers, M. Campillo, Y. Ben-Zion, D. Zigone and F. Vernon (2016), “A methodological approach toward high-resolution surface wave imaging of the San Jacinto Fault Zone using ambient-noise recordings at a spatially dense array”, *Geophysics Journal International*, 206, 980-992.
- P. Roux, D. Bindi, T. Boxberger, A. Colombi, F. Cotton, I. Douste-Bacque, S. Garambois, P. Gueguen, G. Hillers, D. Hollis, T. Lecocq and I. Pondaven (2017), “A new trend toward seismic metamaterials : the Metaforet project”, submitted to *Seismological Research Letters*.
- M. Rupin, S. Catheline and P. Roux (2015), “Super-resolution experiments on Lamb waves using a single emitter”, *Applied Physics Letters* 106, 024103.
- M. Rupin, F. Lemoult, G. Lerosey and P. Roux (2014), “Experimental demonstration of ordered and disordered multi-resonant metamaterials for Lamb waves”, *Physical Review Letters*, 112, 234301.
- K.G. Sabra, P. Roux, A. M. Thode, G. L. D’Spain, W.S. Hodgkiss and W.A. Kuperman (2005a), “Using ocean ambient noise for array self-localization and self-synchronization”, in press, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*.
- K. G. Sabra, P. Roux and W.A. Kuperman (2005b), “Arrival structure of the time-averaged ambient noise cross-correlation function in an oceanic waveguide”, *J. Acoust. Soc. Am.* 117(1), pp. 164-174.
- J. Sarkar, C. Marandet, P. Roux, S. Walker, B. D. Cornuelle and W.A. Kuperman (2012), "Sensitivity kernel for surface scattering in a waveguide", *J. Acoust. Soc. Am.*, 131 (1), 111-118.
- N. Shapiro, M. Campillo, L. Stehly and M.H. Ritzwoller (2005), High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise, *Science* 29, 1615-1617.
- R. Snieder (2004), “Extracting the Green’s function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase”, *Phys. Rev. E*, 69, 046610.
- J. Vandemeulebrouck, P. Roux and E. Cros (2013), “The plumbing of Old Faithful Geyser revealed by hydrothermal tremor”, *Geophysics Research Letters*, doi: 10.1002/grl50422.
- E.G. Williams, P. Roux, M. Rupin and W. A. Kuperman (2015), “Theory of multi-resonant metamaterials for A0 Lamb waves”, *Phys. Rev. B.* 91, 104307.

## Production scientifique

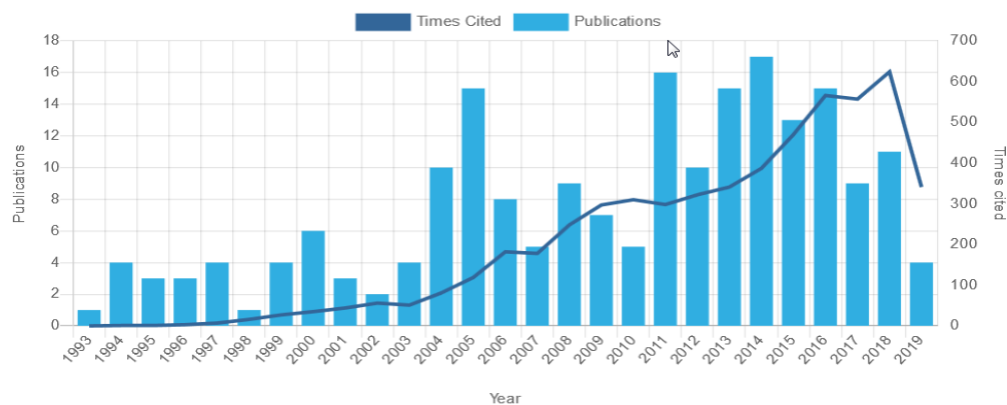
Production scientifique	depuis le début de votre carrière	Depuis Janvier 2015
Nombre de publications dans des revues avec comité de lecture	191	52
Nombre de publications dans des actes de colloque avec comité de lecture	51	9
Nombre de brevets	3	1
Nombre de conférences invitées dans des congrès internationaux	40	14
Nombre d'ouvrages ou de participations importantes à des ouvrages	4	2

## Synthèse graphique des publications : selon Publons / ISI Web of Knowledge (Aout 2019)

Publication metrics

PUBLICATIONS IN WEB OF SCIENCE	SUM OF TIMES CITED	H-INDEX	AVERAGE CITATIONS PER ITEM	AVERAGE CITATIONS PER YEAR
203	5 562	35 <sup>®</sup>	27.7	213.9

Your impact over time



## selon Google Scholar (Aout 2019)

	Toutes	Depuis 2014
Citations	9214	4670
indice h	44	35
indice i10	137	102

## Liste de publications limitée aux journaux avec comité de lecture et aux actes de conférences internationales (à partir de janvier 2015)

### La liste complète des publications peut être obtenue à partir des sites web suivants :

<https://isterre.ujf-grenoble.fr/annuaire/pages-web-du-personnel/philippe-roux>

<http://www.researcherid.com/rid/B-8538-2014>

<https://publons.com/researcher/1758997/philippe-roux>

[https://www.researchgate.net/profile/Philippe\\_Roux2](https://www.researchgate.net/profile/Philippe_Roux2)

Pour information, les numéros ci-dessous correspondent aux numéros des articles dans la liste complète de mes publications. Ainsi, le premier article de 2015 est ma 140<sup>ème</sup> publication de rang A.

### 1- Research Articles and Book Chapter

192- Malgorzata Chmiel, Philippe Roux, Thomas Bardainne,  
High-sensitivity microseismic monitoring: automatic detection and localization using matched-field processing and dense patch arrays  
Geophysics 84(6), 1-14, 2019.

191- Martin Lott and Philippe Roux  
Locally resonant metamaterials for plate waves : the respective role of compressional versus flexural resonances of a dense forest of vertical rods  
In press, Fundamentals and Applications of Acoustic Metamaterials, edited by Vicente Romero, ISTE Ltd, 2019.

190- Geoffroy J. Aubry and Philippe Roux  
Topological effects of a vorticity filament on the coherent backscattering cone  
Phys. Rev. Lett. 123, 035503 – Published 18 July 2019

189- Martin Lott and Philippe Roux  
Effective impedance of a locally resonant metasurface  
Phys. Rev. Materials 3, 065202 – Published 7 June 2019

188- Chloé Gradon, Ludovic Moreau, Philippe Roux, Yehuda Ben Zion  
Analysis of surface and seismic sources in dense array data with Match Field Processing and Markov Chain Monte Carlo sampling  
Geophysical Journal International, Volume 218, Issue 2, August 2019, 1044–1056

187- Aurelien Mordret, Philippe Roux, Pierre Boue and Yehuda Ben-Zion  
Shallow 3-D structure of the San Jacinto Fault zone revealed from ambient noise imaging with a dense seismic array  
Geophysical Journal International, 216 (2), 896-905, FEB 2019

186- Longyu Jiang, Philippe Roux and Jérôme I. Mars,

Raypath separation with a high-resolution algorithm in a shallow-water waveguide  
IEEE Journal of Oceanic Engineering 43 (1), 119-130, 2018.

185- M. Wathelet, B. Guillier, P. Roux, C. Cornou and M. Ohrnberger  
Rayleigh wave Three-component Beamforming: signed ellipticity assessment from high-resolution frequency-wavenumber processing of ambient vibration arrays  
Geophysical Journal International 215 (1), 507-523, 2018.

184- Malgorzata Chmiel, Philippe Roux, Philippe Herrmann, Baptiste Rondeleux, Marc Wathelet  
Data-based diffraction kernels for surface waves from convolution and correlation processes through active seismic interferometry  
Geophysical Journal International, 214 (2), 1468–1480, 2018.

183- Marceau Gresse, Jean Vandemeulebrouck, Svetlana Byrdina, Giovanni Chiodini, Philippe Roux, Antonio Rinaldi, Marc Wathelet, Tullio Ricci, Jean Letort, Zaccaria Petrillo, Paola Tuccimei, Carlo Lucchetti, and Alessandra Sciarra  
Anatomy of a fumarolic system inferred from a multiphysics approach  
Scientific Reports 8 (1), 7580, 2018

182- Brossault, MA, Roux P, Guéguen P  
The fluctuation–dissipation theorem used as a proxy for damping variations in real engineering structures  
Engineering Structures, 167, 65-73, 2018.

181- Sébastien Guenneau, Stefan Enoch, Andrea Colombi, Philippe Roux, Stéphane Brule  
Métamatériaux pour la protection sismique,  
Photoniques, 37-40, 2018.

180- Philippe Roux, Dino Bindi, Tobias Boxberger, Andrea Colombi, Fabrice Cotton, Isabelle Douste-Bacque, Stéphane Garambois, Philippe Gueguen, Gregor Hillers, Dan Hollis, Thomas Lecocq and Ildut Pondaven,  
Toward seismic metamaterials: the METAFORET project  
Seismological Research Letters, 89, 582-593, 2018.

179- O. Amoroso, G. Festa, P. P. Bruno, L. D’Auria, G. De Landro, V. Di Fiore, S. Gammaldi, S. Maraiò, M. Pilz, P. Roux, G. Russo, V. Serlenga, M. Serra, H. Woith, A. Zollo,  
Integrated tomographic methods for seismic imaging and monitoring of volcanic caldera structures and geothermal area,  
J. Appl. Geophysics., 2017.

178- Perry Naughton, Philippe Roux, Curt Schurgers, Ryan Kastner, Jules Jaffe and Paul Roberts,  
Self-localization of a deforming swarm of underwater vehicles using impulsive sources of opportunity,  
IEEE Access, vol. 6, 1635-1646, 2017.

177-Lise Retailleau, Matthieu Landes, Lucia Gualtieri, Nikolai M. Shapiro, Michel Campillo, Philippe Roux, Jocelyn Guilbert,

Detection and analysis of a transient energy burst with beamforming of multiple teleseismic phases, *Geophys. J. Int.* 212(1), 14-24, 2017.

176- Aida Hejazi Nooghabi, Lapo Boschi, Philippe Roux, and Julien de Rosny  
Coda reconstruction from cross-correlation of a diffuse field on thin elastic plates  
*Physical Review E*, 96(3), 032137, DOI: 10.1103/PhysRevE.96.032137, 2017.

175- Andrea Colombi, Richard Craster, Daniel John Colquitt, Sebastien Guenneau, Younes Achaoui, Philippe Roux and Matthieu Rupin,  
Elastic wave control beyond band-gaps: shaping the flow of waves in plates and half-spaces with subwavelength resonant rods  
*Frontiers in Mechanical Engineering*, section Mechanics of Materials, doi: 10.3389/fmech.2017.00010, 2017.

174- Maria Saade, Jean-Paul Montagner, Philippe Roux, K. Shiomi, B. Enescu, Florent Brenguier.  
Monitoring of seismic anisotropy at the time of the 2008 Iwate-Miyagi (Japan) earthquake  
*Geophysical Journal International* 211 (1), 483-497, 2017.

173- Philippe Roux and Yehuda Ben-Zion,  
Rayleigh phase velocities in Southern California from beamforming short duration ambient noise  
*Geophysical Journal International* 211 (1), 450-454, 2017.

172- Philippe Roux, Matthieu Rupin, Fabrice Lemoult, Geoffroy Lerosey, Andrea Colombi, Richard Craster, Sébastien Guéneau, W. A. Kuperman and Earl G. Williams,  
New Trends toward locally-resonant metamaterials at the mesoscopic scale  
*World Scientific Handbook of Metamaterials and Plasmonics*, Edited by R. Craster and S. Guenneau, Vol. 2, Chap. 6, pp. 251-300, 2017.

171- Matthieu Rupin and Philippe Roux,  
A multi-wave elastic metamaterial based on degenerate local resonances  
*Journal of the Acoustical Society of America Express Letters* 142(1), EL75-81, 2017.

170- Andrea Colombi, Victoria Ageeva, Richard Smith, Adam Clare, Rikesh Patel, Matt Clark, Daniel Colquitt, Philippe Roux, Sébastien Guenneau, and Richard Craster,  
Enhanced sensing and conversion of ultrasonic Rayleigh waves by elastic metasurfaces  
*Scientific Reports* 7, 6750, doi: 10.1038/s41598-017-07151-6, 2017.

169- Earl G. Williams, Jeffery D. Tippmann, Sandrine T. Rakotonarivo, Philippe Roux and W.A. Kuperman,  
Experimental estimation of in vacuo structural admittance using random sources in a non-anechoic room,  
*Journal of the Acoustical Society of America*, 142(1), 103-109, 2017.

168- Longyu Jiang, Philippe Roux and Jérôme I. Mars,  
Raypath separation with a high-resolution algorithm in a shallow-water waveguide  
*IEEE Journal of Oceanic Engineering* 43 (1), 119-130.



- 167- Daniel J. Colquitt, Andréa Colombi, Richard V. Craster, Philippe Roux and Sébastien Guéneau,  
Seismic metasurfaces: Sub-wavelength resonators and Rayleigh wave interaction  
Journal of the Mechanics and Physics of Solids 99, 379-393, 2017.
- 166- Longyu Jiang, Yaping Hong, Philippe Roux, Jiasong Wu, Huazhong Shu,  
Active wideband higher-order raypath separation in multipath environment  
JASA express Letter 141(1), EL38-EL44, 2017.
- 165- Perry Naughton, Philippe Roux, Riley Yeakle, Curt Schurgers, Ryan Kastner, Jules S. Jaffe  
and Paul L. D. Roberts,  
Ambient Noise Processing on a Mobile Deformable Array  
The Journal of the Acoustical Society of America, 140 (6), 4260-4270, 2017.
- 164- Gregor Hillers, Philippe Roux, Michel Campillo and Yehuda Ben-Zion  
Focal spot imaging based on zero lag cross correlation amplitude fields: Application to dense array  
data at the San Jacinto fault zone  
Journal of Geophysical Research - Solid Earth, 121(11), 8048-8067, 2016.
- 163- Malgorzata Chmiel, Philippe Roux and Thomas Bardainne  
Extraction of phase and group velocities from ambient surface noise in a patch-array configuration  
Geophysics, 81 (6), KS231-KS240, 2016.
- 162-Philippe Guéguen, Paul Johnson and Philippe Roux  
Nonlinear dynamics induced in a structure by seismic and environmental loading  
The Journal of the Acoustical Society of America, 140 (1), 582-590, 2016.
- 161- Andrea Colombi, Daniel Colquitt, Philippe Roux, Sébastien Guenneau, and Richard Craster,  
A seismic metamaterial: The resonant metawedge  
Scientific Reports 6, 27717, 2016.
- 160- Philippe Roux, Ludovic Moreau, Albanne Lecointre, Gregor Hillers, Michel Campillo,  
Yehuda Ben-Zion, Dimitri Zigone and Frank Vernon,  
A methodological approach toward high-resolution surface wave imaging of the San Jacinto  
Fault Zone using ambient-noise recordings at a spatially dense array  
Geophysics Journal International, 206, 980-992, 2016.
- 159- Andrea Colombi, Sébastien Guenneau, Philippe Roux, and Richard Craster  
Transformation seismology: composite soil lenses for steering surface elastic Rayleigh waves  
Scientific Reports 6, 25320, 2016.
- 158- Marcello Serra, Gaetano Festa, Philippe Roux, Marceau Gresse, Jean Vandemeulebrouck  
and Aldo Zollo,  
A strongly heterogeneous hydrothermal area imaged by surface waves: the case of Solfatara,  
Campi Flegrei, Italy,  
Geophysics Journal International 205(3), 1813-1822, 2016.

- 157- John Y. Yoritomo, Richard L. Weaver, Philippe Roux, Matthieu Rupin and Earl G. Williams,  
On band gap predictions for multiresonant metamaterials on plates (L),  
J. Acous. Soc. Am., 139 (3), 1282-1284, 2016.
- 156- Nori Nakata, Pierre Boué, Florent Brenguier, Philippe Roux, Michel Campillo, and Valérie Ferrazzini  
Body- and surface-wave reconstruction from seismic-noise correlations between arrays at Piton de la Fournaise volcano  
Geophysical Research Letters 43(3), 1047-1054, 2016.
- 155- Andrea Colombi, Philippe Roux, Sebastien Guenneau, Philippe Gueguen, and Richard V. Craster  
Forests as a natural seismic metamaterial: Rayleigh wave bandgaps induced by local resonances  
Scientific Reports 6, 19238, 2016.
- 154- J. Chaput, V. Clerc, M. Campillo, P. Roux and H. Knox  
On the practical convergence of coda-based correlations: A window optimization approach  
Geophysical Journal International 204 (2), 704-715, 2016.
- 153- G. Olivier, F. Brenguier, M. Campillo, P. Roux, N.M. Shapiro and R. Lynch  
Investigation of co- and post-seismic processes using in-situ measurements of seismic velocity variations in an underground mine  
Geophysical research Letters 42(21), 9261-9269, 2016.
- 152- 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 and 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.
- 151- Matthieu Rupin, Philippe Roux, Geoffroy Lerosey, and Fabrice Lemoult  
Symmetry issues in the hybridization of multi-mode waves with resonators: an example with Lamb waves metamaterial,  
Scientific Reports 5, 13714, 2015.
- 150-Earl G. Williams, Philippe Roux, Matthieu Rupin and W. A. Kuperman  
Theory of multi-resonant metamaterials for A0 Lamb waves  
Phys. Rev. B, 91, 104307, 2015.
- 149- Andrea Colombi, Philippe Roux, Sébastien Guenneau, and Rupin Matthieu  
Directional cloaking of flexural waves in a plate with a locally resonant metamaterial  
The Journal of the Acoustical Society of America 137 (4), 1783-1789, 2015.
- 148- Fabian Walter, Philippe Roux, Claudia Rösli, Albanne Lecointre, Debi Kilb and Pierre-Francois Roux

Using glacier seismicity for phase velocity measurements and Green's function retrieval  
Geophysical Journal International 201 (3), 1722-1737, 2015.

147- E. Tudisco, P. Roux, S. A. Hall, G.M.B. Viggiani and G. Viggiani,  
Timelapse ultrasonic tomography for measuring damage localization in geomechanics laboratory tests,  
Journal of the Acoustic Society of America, 137(3), 1389-1400, 2015.

146- G. Olivier, F. Brenguier, M. Campillo, R. Lynch and P. Roux,  
Body-wave reconstruction from ambient seismic noise correlations in an underground mine,  
Geophysics, 80 (3), KS11-KS25, 2015.

145- B. De Cacqueray, P. Roux and M. Campillo,  
Using slowness and azimuth fluctuations as new observables for four-dimensional reservoir seismic monitoring  
Geophysical Prospecting, DOI: 10.1111/1365-2478.12338, Nov. 2015.

144- M. Saade, J.P. Montagner, P. Roux, P. Cupillard, S. Durand and F. Brenguier,  
Influence of seismic anisotropy on the cross correlation tensor: numerical investigations,  
Geophys. J. Int., 201 (2), 595-604, 2015.

143- J. Chaput, M. Campillo, R. C. Aster, P. Roux, P.R. Kyle, H. Knox and P. Czoski,  
Multiple scattering from icequakes at Erebus Volcano, Antarctica; Implications for imaging at glaciated volcanoes,  
Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120, doi:[10.1002/2014JB011278](https://doi.org/10.1002/2014JB011278), 2015.

142- M. Rupin, S. Catheline and P. Roux,  
Super-resolution experiments on Lamb waves using a single emitter,  
Applied Physics Letters 106, 024103, 2015.

141- L. Retailleau, N. M. Shapiro, J. Guilbert, M. Campillo and P. Roux,  
Detecting and locating events with using USArray as a large antenna  
Advances in Geosciences 40, 27-30, Jan. 2015.

140- Dimitri Zigone, Yehuda Ben-Zion, Michel Campillo and Philippe Roux  
Seismic tomography of the Southern California plate boundary region from noise-based Rayleigh and Love waves  
Pure and Applied Geophysics, 172, 1007-1032, doi: 10.1007/s00024-014-0872-1, 2015.

## **2- Conference Proceedings**

51- P Naughton, T Salam, P Tueller, P Roux, C Schurgers, R Kastner, J Jaffe, ...  
Self-synchronization of multiple vehicles using ambient impulsive noise  
2018 Fourth Underwater Communications and Networking Conference (UComms), 1-5

50- G Olivier, M Chmiel, F Brenguier, P Roux, A Mordret, P Dales, T Lecocq, ...  
Processing passive seismic data recorded on a dense array for CCS site characterization

SEG Technical Program Expanded Abstracts 2018, 3002-3006

49- R Craster, A Colombi, P Roux.

Elastic Metamaterials applied to Geophysics

Impact 2018 (5), 68-70

48- J Aichele, S Catheline, P Roux, S Latour, C Voisin

Ultrafast ultrasound captures dynamic rupture behavior

Proceedings of Meetings on Acoustics 21ISNA 34 (1), 045044, 2017.

47- A Colombi, P Roux, D Colquitt, R Craster, S Guenneau

Conversion and reflection of Rayleigh waves with the seismic metawedge

2016 10th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (METAMATERIALS), 313-315

46- J. D. Tippmann, Sandrine T. Rakotonarivo, William Kuperman, Z. Waters, P. Roux, and E.G. Williams,

Measurement of a target's structural admittance and the prediction of its scattered field in different media

Proceedings of the 2nd International Congress on Acoustics, Sep 2016, Buenos Aires, Argentina.

45- C. Gradon, L. Moreau, P. Roux, A. Lecointre, Y. Ben Zion,

Extraction des ondes sismiques sur la faille de San Jacinto via le bruit sismique ambiant et un réseau dense de capteurs

CFA/VISHNO 2016, Le Mans (France), 11-15 April 2016, 241-246.

44- A Mours, JI Mars, C Ioana, NF Josso, Y Doisy, P Roux (2015)

Range, velocity and immersion estimation of a moving target in a water-filled tank with an active sonar system

OCEANS 2015-Genova, 1-6.

43- JS Jaffe, PLD Roberts, P Roux (2015)

Using underwater ambient sound to localize swarms of underwater vehicles

OCEANS 2015-Genova, 1-4.

### **III- Enseignement, formation et diffusion de la culture scientifique**

#### **Encadrement de post-doctorants (avec nombre de papiers communs entre parenthèse).**

##### **En cours (2) :**

- Benoit Tallon – janvier 2019 – novembre 2020.
- Martin Lott – octobre 2017 – octobre 2020 (2).

##### **Passé (7):**

- Jacques Rivière – octobre 2016 – octobre 2018.
- Andréa Colombi, juin 2013 – janvier 2015 (13).
- Fabian Walter, octobre 2012 - octobre 2014 (1).
- Lenaïc Bonneau, janvier 2011 - mai 2012 (1).
- Margherita Corciuolo, juin 2009 - mars 2012 (2).
- Alexei Sukhovich, mars 2008 – décembre 2009 (1).
- Eric Larose, mars 2006- octobre 2006 (6).

#### **Encadrement d'étudiants en thèse (avec nombre de papiers communs entre parenthèse).**

##### **En cours (2) :**

- Tobias Van Baarsel (co-directeur de thèse), débutée septembre 2016.
- Johannes Aichele (co-directeur de thèse), débutée janvier 2016.

##### **Passé (17):**

- Chloe Gradon (co-directeur de thèse), soutenue janvier 2019 (1).
- Marc-Antoine Brossault (co-directeur de thèse), soutenue février 2017 (1).
- Malgorzata Chmiel (directeur de thèse), soutenue février 2017 (3).
- Vincent Clerc (co-directeur de thèse), soutenue janvier 2017 (1).
- Matthieu Rupin (co-directeur de thèse), soutenue avril 2014 (11).
- Florent Aulanier (co-directeur de thèse), soutenue janvier 2014 (3).
- Pierre Boué (co-directeur de thèse), soutenue décembre 2013 (4).
- Erika Tudesco (co-directeur de thèse), soutenue mars 2013 (1).
- Benoit De Cacqueray (directeur de thèse), soutenue janvier 2013 (3).
- Christian Marandet (directeur de thèse), soutenue novembre 2011 (5).
- Bérénice froment (co-directeur de thèse), soutenue novembre 2011 (2).
- Estelle Cros (co-directeur de thèse), soutenue novembre 2011 (3).
- Thomas Gallot (co-directeur de thèse), soutenue novembre 2010 (4).
- Ion Iturbe (co-directeur de thèse), soutenue janvier 2009 (4).
- Pierre Gouédard (directeur de thèse), soutenue décembre 2008 (5).
- Shane Walker (co-directeur de thèse), soutenue décembre 2015 (8).
- Stéphane Conti (directeur de thèse), soutenue mars 2005 (9).

#### **Encadrement d'étudiants en master (12 stages longue durée depuis 2010)**

- Benoit Urruty, M2R Géophysique Grenoble, mars à juillet 2019.
- Alexis Falcin, M2R Géophysique Grenoble, mars à juin 2018.
- Lucas Pomot, Master Applied Geophysics (Deft, Pays-Bas), mars à août 2016.
- Georges Roussel, M2R Acoustique Mans, mars à juin 2015.
- Julian Kuhnert, Université Constance (Allemagne), mars à août 2014.
- François Papillon, M2R Paris Tech, mars à août 2014.
- Eymard Houara, M2R UJF Grenoble, mars à juin 2013.

- Vincent Clerc, M2R UJF Grenoble, mars à juin 2012.
- Ali Zorgani, M2Pro UJF Grenoble, mars à juin 2012.
- Anais Boué, M2R UJF Grenoble, mars à juin 2010.
- Pierre Boué, M2R EOST Strasbourg, mars à juin 2010.
- Jean Letort, M2R EOST Strasbourg, mars à juin 2010.

### **Organisation de conférences, de workshops ou colloques**

- Organisateur du workshop « METAgenierie 2019 », 1st-5th July, Oleron, France (40 participants).
- Organisateur du workshop « Passive Imaging and Monitoring in wave physics: from seismology to ultrasound », 4-9th June 2017, Cargèse, France (100 participants).
- Organisateur du workshop « Premières journées du GDR META », 7-9th June 2016, Cargèse, France (35 participants).
- Organisateur du workshop « Passive Imaging and Monitoring in wave physics: from seismology to ultrasound », 9-14th May 2015, Cargèse, France (95 participants).
- Organisateur du workshop « Passive Imaging and Monitoring in wave physics: from seismology to ultrasound », 22-27th April 2013, Cargèse, France (90 participants).
- Organisateur du workshop « Passive Imaging in wave physics: from seismology to ultrasound », 9-13 Mai 2011, Cargèse, France (90 participants).

### **Enseignement**

- Novembre 2011-2019 : 10h de cours au M2 SIM (UJF Grenoble), « Inversion Acoustique ».
- Novembre 2010-2016: 9h de TP en L2 (UJF Grenoble), « Conduction de la chaleur ».
- CU Magistère 2014-2016 : 10h de cours en L2 (UGA Grenoble) « Tracé de rayon et tomographie acoustique océanique »
- Janvier 2014 : 20h de cours Magistère L2 (UJF Grenoble), « Imagerie des milieux naturels ».
- Janvier 2014 : 25h de cours en 3<sup>ème</sup> année d'école d'ingénieur (INP Grenoble), « Imagerie acoustique ».
- Janvier 2013 : 25h de cours au M2 Pro Acoustical Imaging (UJF Grenoble), « Echographie et Tomographie acoustique ».
- Janvier 2007-2011: 12h de cours au M2 Pro d'Acoustique Ultrasonore (UJF Grenoble), « Techniques d'inversion ».

### **Diffusion de la culture scientifique**

#### **Projet METAFORÉ**

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

#### **Projet RESOLVE**

- Nov. 2018 : Participation aux Journées Montagne et Sciences (Palais des Sports de Grenoble) avec la projection du film « Un glacier sur écoute » : <https://resolve.osug.fr/spip.php?article30>
- Janv. 2019 : Participation à Zestes de Sciences / Les séries originales du CNRS avec le film : « Piège de glace : le cri du glacier », à voir sur le site <https://resolve.osug.fr/spip.php?article47>

- avril 2019 : co-rédaction d'un article grand public (15 pages) intitulé « A l'écoute du murmure du glacier », publié dans "Carnet de mission" édité par le CNRS, à lire sur <https://lejournel.cnrs.fr/articles/le-murmure-du-glacier>

## IV- Transfert technologique, relations industrielles et valorisation

### Brevets:

- M. Chmiel, P. Roux, T. Bardainne, "Processing seismic data to remove noise", July 2016, CGG Services S.A., US 20160209537A1.
- B. de Cacqueray, P. Roux: "System and method for three-dimensional iterative filtering of scattered waves in cross-spread seismic system", Sept. 2013, CGG Services S.A., US 20140095079.
- B. de Cacqueray, P. Roux, M. Campillo, S. Catheline, J. Meunier, T. Bianchi: "Device and method for computing depth velocity variations", March 2012, CGG Services S.A., CGG Services S.A., EP 2594964, US 20130131991.

**Création de la start-up SISPROBE** (<http://www.sisprobe.com/>) en janvier 2016, dont je suis un des actionnaires. SISPROBE est une société de service dans le domaine de l'imagerie et du monitoring à partir du bruit sismique ambiant. En septembre 2019, la société emploie sept personnes pour un chiffre d'affaire annuel supérieur à 600 k€.

### Contrats passés comme porteur de projet (depuis 2009) :

- **Responsable scientifique** de la Bourse Européenne Pierre et Marie Curie (post-doc Jacques Rivière – 2016-2018) : « Imaging Nonlinear Elasticity for seismology », pour un montant total de 173 k€.
- **Responsable scientifique** du projet TOMO-NOISE (2014-2017) financé par CGG – Veritas: « Geophysical processing with dense arrays and active seismic configurations », pour un montant total de 103 k€.
- **Responsable scientifique** du projet Défi Imag'in RESOLVE (2016) financé par le CNRS: « Fouille de données géophysiques : Imagerie multi-physique haute-résolution et Monitoring de la faille de San Jacinto (Californie) », pour un montant total de 43 k€.
- **Responsable scientifique** du projet ECHOFISH (2016) financé par l'UGA (Université Grenoble Alpes): « Imagerie échographique de bancs de poisson », pour un montant total de 20 k€.
- **Responsable scientifique** du projet METAFORÉ (2016) financé par la Mission pour l'Interdisciplinarité INSU-CNRS: « Une forêt se comporte-t-elle comme un métamatériau pour les ondes sismiques ? », pour un montant total de 40 k€.
- **Responsable scientifique** de la Bourse Européenne Pierre et Marie Curie (post-doc Fabian Walter – 2012-2014) : « Ice dynamic investigations with seismological components », pour un montant total de 193 k€.
- **Direction ou co-direction** de plusieurs contrats industriels avec la Direction Générale de l'Armement (2009-2011), et les compagnies pétrolières Shell (2006-2010), Total (2009-2011) et CGG-Véritas (2010-2013) pour un montant total de 410 k€.

### Contrats passés comme membre participant (depuis 2009) :

- **Membre participant (12 mois)** du projet européen ITN WAVES (2014-2018) : « Waves and Wave-Based Imaging in Virtual and Experimental Environments », dont le PI est Lapo Boschi, pour un montant géré de 120 k€.



- **Membre participant (9 mois)** du Prix Del Duca (Grand Prix de l'Académie des Sciences 2013) : “Bruit ambiant et ondes diffuses pour l'imagerie et le suivi temporel en géophysique: une approche multi-disciplinaire du laboratoire à l'échelle globale”, dont le PI est Michel Campillo, pour un montant géré de 95 k€.

- **Membre participant (12 mois)** de l'ERC Advanced Grant Whisper (2009-2014): “Towards continuous monitoring of the continuously changing earth”, dont le PI est Michel Campillo, pour un montant géré de 150 k€.

- **Membre participant (6 mois)** de l'ANR Jeune Chercheur TOTS (2010-2013) : « Tomographie Océanique en zone peu profonde : nouvelles perspectives en Traitement du Signal », dont le PI est Barbara Nicolas, pour un montant géré de 95 k€.

- **Membre participant (3 mois)** de l'ANR Risk'Nat G-GAP (2009-2012) : « Nouvelles perspectives sur le risque sismique associé à la subduction: transitoires, tremors, monitoring passif, tectonique et scénarios », dont la PI est Andréa Walsperdorf, pour un montant géré de 15 k€.

- **Membre participant (3 mois)** de l'ANR GeoBridge (2009-2013) : « Rupture des géomatériaux cohésifs : liens entre les échelles », dont le PI est Cristian Dascalu, pour un montant géré de 16 k€.

#### Contrats en cours:

<i>Project Title</i>	<i>Funding source</i>	<i>Amount (Euros)</i>	<i>Period</i>	<i>Role of the PI</i>	<i>Major subject</i>
METAFORET	ANR	305,000	10/2016 to 09/2020	Principal Investigator	Wave Physics
RESOLVE	UGA	215,000	03/2017 to 06/2020	Principal Investigator	Geophysics
VIBEA	FEAMP Agrimer	227,000	11/2017 to 11/2020	Participant	Wave Physics
ITN URBASIS	EC	190,000	11/2018 to 11/2022	Participant	Geophysics

## V - Responsabilités collectives et management de la recherche

### Responsabilités collectives :

- à venir en déc. 2019 : Directeur du laboratoire ISTerre (~280 personnes dont 150 permanents).
- depuis nov. 2018 : Membre du bureau de l'ITN URBASIS : « New challenges for Urban Engineering Seismology ».
- depuis oct. 2017 : Membre du conseil scientifique de l'Institut d'Etude Scientifique de Cargèse (IESC).
- depuis sept. 2016 : Membre nommé de la section 18 du CNRS: « Terre et planètes telluriques : structure, histoire, modèles ».
- depuis janv. 2016 : Membre du bureau du GDR META : « Métamatériaux acoustiques pour l'ingénierie ».
- 2012-2017 : Direction de l'Equipe Ondes et Structure (~50 personnes dont 17 chercheurs permanents et 7 ITA).
- 2012-2016 : Membre nommé de la commission CGRA1 de l'IRD (Institut de Recherche et Développement): « Ingénierie et expertise ».
- 2015-2018: Membre du bureau de l'ITN WAVES: “Waves and Wave-Based Imaging in Virtual and Experimental Environments”.

### Participation à 4 jurys de recrutement de chercheurs / ingénieurs :

- Stefan Catheline, poste de Professeur UJF, septembre 2008.
- Romain Brossier, poste d'Enseignant chercheur UJF, mai 2011.
- Albanne Lecointre, poste d'Ingénieur de recherche CNRS, novembre 2012.
- Pierre Boué, poste d'Enseignant chercheur UJF, mai 2015.

### Participation à des jurys de thèse ou habilitation à diriger les recherches (58 depuis 2005):

Un petit commentaire avant cette liste exhaustive. Depuis quelques années, j'ai pris le parti d'accepter toutes les propositions de jury de thèse et d'HDR et, en contrepartie, de limiter fortement mes réponses positives aux très nombreuses sollicitations pour les reviews d'articles. A dire vrai, je m'amuse beaucoup plus à lire et comprendre le travail de mes collègues (jeunes ou expérimenté.e.s) à travers un manuscrit long mais complet, le plus souvent écrit dans une démarche pédagogique claire, qu'à m'échiner à évaluer des papiers parfois mal écrits et souvent éloignés de mon domaine d'expertise. Je participe donc à beaucoup de jurys (6 en 2019) et je fais peu de « reviews » (4-5 par an au plus). L'un dans l'autre, le temps passé à travailler sur la littérature scientifique est probablement le même...

- Pierre Delplace (rapporteur, HDR), 2019, ENS Lyon.
- Eric Bavu (rapporteur, HDR), 2019, CNAM, Paris.
- Lucas Pomot (rapporteur, Thèse), 2019, Université Aix-Marseille, Marseille.
- Johannes Aichele (co-directeur, thèse), 2019, UGA, Grenoble.
- Chloé Gradon (co-directeur, thèse), 2019, UGA, Grenoble.
- Simon Yves (président jury, thèse), 2019, UPMC, Paris.
- Rémi Emmetière (président jury, thèse), 2018, Université Bretagne Occidentale, Brest.
- Arthur Lacroix, (rapporteur, thèse), 2018, UPMC, Paris.
- Aida Aichele (co-directeur, thèse), 2018, UPMC, Paris.

- Daniel Brito (rapporteur, HDR), 2018, Université Pays de l'Adour, Pau.
- Marc-Antoine Brossault (co-directeur, thèse), 2017, UGA, Grenoble.
- Julien Bonnel (rapporteur, HDR), 2017, Université Bretagne Occidentale, Brest.
- Marceau Gresse (co-directeur, thèse), 2017, UGA, Grenoble.
- Benoit Tallon (président jury, thèse), 2017, Université Bordeaux.
- Martin Lott (président jury, thèse), 2017, Université Aix-Marseille.
- Malgorzata Chmiel (directeur, thèse), 2017, UGA, Grenoble.
- Vincent Clerc (directeur, thèse), 2017, UGA, Grenoble.
- Alexis Mours (président jury, thèse), 2017, UGA, Grenoble.
- Gaurav Tomar (rapporteur, thèse), 2016, IPGP Paris.
- Leonard Seydoux (examineur, thèse), 2016, IPGP Paris.
- Benoit Gérardin (rapporteur, thèse), 2016, Institut Langevin.
- Ali Zorgani (rapporteur, thèse), 2016, INSERM Lyon.
- Alexis Mours (examineur, thèse), 2016, UGA, Grenoble.
- Vincent Rossetto (examineur, HDR), 2015, UJF Grenoble.
- Pierre Méresse (rapporteur, thèse), 2015, Université Bretagne Occidentale, Brest.
- Lise Retailleau (examineur, thèse), 2015, IPGP Paris.
- Cédric Payan, (rapporteur, HDR), 2015, Université Aix-Marseille.
- Sandra Barbouteau, (examineur, thèse), 2014, UJF Grenoble.
- Raphael Valensi (rapporteur, thèse), 2014, Université de Nantes.
- Francois Lavoué (président jury, thèse), 2014, UJF Grenoble.
- Matthieu Rupin (co-directeur, thèse), 2014, UJF Grenoble.
- Florian Aulanier (co-directeur, thèse), 2014, INP Grenoble.
- Pierre Boué (co-directeur, thèse), 2013, UJF Grenoble.
- Erika Tudesco (co-directeur, thèse), 2013, UJF Grenoble.
- Thomas Planes (président jury, thèse), 2013, UJF Grenoble.
- Bastien Arnal (rapporteur, thèse), 2013, Université Paris Diderot.
- Longyu Jiang (président jury, thèse), 2012, INP Grenoble.
- Cedric Gervaise (rapporteur, HDR), 2012, Université Brest.
- Jean-Marie Lalande (rapporteur, thèse), 2012, Ecole Centrale Lyon.
- Samuel Pinson (rapporteur, thèse), 2011, Ecole Navale, Brest.
- Céline Hadziioannou (président jury, thèse), 2011, UJF Grenoble.
- Christian Marandet (directeur, thèse), 2011, UJF Grenoble.
- Bérénice froment (co-directeur, thèse), 2011, UJF Grenoble.
- Estelle Cros (co-directeur, thèse), 2011, Université Chambéry.
- Thomas Gallot (co-directeur, thèse), 2010, UJF Grenoble.
- Alexios Korakas (rapporteur, thèse), 2010, Ecole Centrale Lyon.
- Ion Iturbe (co-directeur, thèse), 2010, INP Grenoble.
- Matthieu Landès (rapporteur, thèse), 2009, IPG Paris.
- Elisabeth Canet (président jury, thèse), 2009, UJF Grenoble.
- Pierre Gouédard (directeur, thèse), 2008, UJF Grenoble.
- Franck Philippe (rapporteur, thèse), 2008, Université Paris Diderot.
- Lili Ganjehi, (rapporteur, thèse), 2008, Université Paris 6.
- Francois Gerlotto (rapporteur, HDR), 2007, Université Montpellier 2.
- Jean-Luc Robert (rapporteur, thèse), 2007, Université Paris 6.
- Delphine Palaccio (rapporteur, thèse), 2006, Université Paris 6.
- Cyril Kotenkoff (examineur, thèse), 2006, UJF Grenoble.

- Stéfan Catheline (rapporteur, HDR), 2006, Université Paris Diderot.
- Stéphane Conti (directeur, thèse), 2005, Université Paris 6.

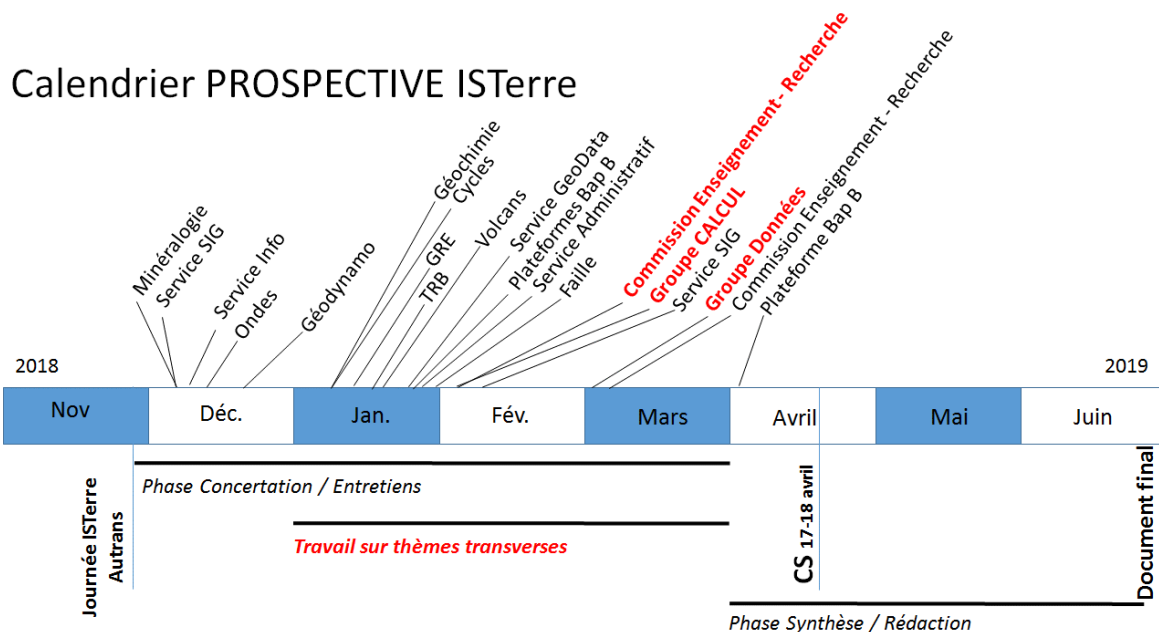
**Travaux de Reviewer et d'Editeur associé:**

- Reviewer régulier pour les journaux suivants: Journal of the Acoustical Society of America, Physical Review E, Geophysics Research Letters, Journal of Geophysical Research-Solid Earth, Geophysics Journal International.
- depuis 2016 : Associate Editor for "Acoustics".
- 2012 Editors' Citation for Excellence in Refereeing for Journal of Geophysical Research-Solid Earth.

## VI- Projet de recherche

### Préambule

Il est compliqué de définir un projet de recherche quand on s'apprête à prendre la direction d'un laboratoire d'environ 300 personnes pour 5 ans. Depuis les « journées du laboratoire » (nov. 2018), qui furent le lancement de la prospective du laboratoire avec en point d'orgue le document HCERES définitif transmis aux tutelles en juillet 2019 (Fig. 20), mon temps de recherche s'est considérablement réduit au profit d'une réflexion individuelle et collective sur les forces et les faiblesses d'ISTerre au niveau local, national et international.



**Fig. 20 :** Calendrier des rencontres et entretiens avec l'ensemble des équipes de recherche (9) du laboratoire ISTerre, ainsi que des services et des plateformes où travaillent les ITAs. Ces réflexions ont amené la future équipe de direction à la création de nouveaux groupes (groupe calcul, groupe données, commission enseignement recherche) pour permettre plus de transversalité entre les différents personnels et les différentes expertises partagées au sein du laboratoire.

Ce travail fut intéressant, voire passionnant par moment, et je pense être prêt, avec l'équipe de direction qui m'accompagne, à assumer cette tâche de service pour les 5 années à venir. Bien entendu, ces phases de concertation et de discussion sont très chronophages et l'erreur serait d'y aller à reculons. Sans un investissement personnel important, ce travail de management d'un gros laboratoire risque d'être bâclé car insuffisant, ce qui génèrera frustration et incompréhension pour tout le monde.

Je suis conscient qu'entre ma participation aux travaux de la section 18 du comité national et la direction d'ISTerre, mon temps de recherche risque de ne pas dépasser 20% en rythme annuel dans les années à venir. Le nombre de publications en 2018 (7) et 2019 (6) ont déjà montré ce fléchissement que j'assume parfaitement. Je reste cependant un chercheur avec la responsabilité scientifique de plusieurs projets en cours. La recherche est ma passion et le challenge qui se présente à moi est simplement d'être plus efficace sur les choix stratégiques qui devront être fait en matière de méthodologie scientifique. En d'autres termes, en faire moins certes, mais tacher de faire mieux...

Le projet de recherche que je présente ci-dessous tient compte de cette inflexion professionnelle. Dans la logique de mes travaux de recherche passés, je compte restreindre mon activité à trois projets en cours :

- (1) le projet METAFORÉ dont l'objet est l'application de la physique des métamatériaux aux ondes sismiques (voir description dans mon bilan d'activité),
- (2) le projet RESOLVE qui vise à développer une plateforme multi-physique pour l'imagerie haute résolution d'objets naturels comme les glaciers, les mouvements de terrain ou les zones à forte activité géothermale
- (3) le projet VIVEA dont l'objet est d'étudier la diffusion dans les bancs de poisson afin de déterminer un proxy pour la biomasse présente dans les cages de fermes aquacoles.

A travers ces trois projet, j'orienterai ma démarche scientifique (i) vers les aspects multi-échelles labo/terrain permettant d'identifier et de comprendre des phénomènes physiques liés à la propagation d'ondes en milieu complexe (phénomènes de frictions, diffusion multiple dans les bancs de poisson, par exemple) et (ii) vers l'utilisation de réseaux de capteurs pour extraire la cohérence spatiale et temporelle des champs d'ondes (acoustiques et élastiques) dans une approche multi-physique (couplage de plusieurs observables de natures différentes sur les glaciers, par exemple).

**1- Projet RESOLVE: High-resolution imaging in subsurface geophysics: development of a multi-instrument platform for interdisciplinary research – [\(https://resolve.osug.fr/\)](https://resolve.osug.fr/)**

Dans les films de science-fiction, l'avenir est souvent décrit comme un monde de capteurs. Ce qui est vrai pour notre vie quotidienne, l'est évidemment pour nos domaines scientifiques. Les capteurs se sont répandus partout, et les sciences de la Terre ne font pas exception. Pour préparer cette transition, les ingénieurs doivent mettre au point des capteurs sismiques avancés et les informaticiens doivent traiter d'énormes volumes de données. Plus important encore, nous avons besoin de nouvelles méthodologies pour extraire toutes les informations potentielles de la densité sans précédent de ces sismomètres. Cet aspect s'adresse aux spécialistes de la physique des ondes. C'est le point de vue du projet RESOLVE : profiter des réseaux sismiques denses pour inventer et développer des méthodes géophysiques qui produiront des images optimales, avec des applications à haute résolution spatiale et une surveillance continue de la structure terrestre à différentes échelles. Parmi les objectifs figurent la localisation 3D d'événements micro-sismiques enfouis dans le bruit et le suivi continu des changements locaux de la contrainte en profondeur, avec des applications dans différents contextes. A l'échelle sismologique, une application majeure est l'imagerie 3D et la surveillance de structures géologiques délicates ou dangereuses, comme les glaciers, les volcans et les failles actives. Les applications à plus petite échelle concernent l'évaluation environnementale dans l'industrie pétrolière et gazière, grâce à la surveillance continue des processus de fracturation induits par l'extraction des hydrocarbures. Pour atteindre ces objectifs, nous proposons également de relier la géophysique à l'échelle du laboratoire, par des expériences contrôlées. Des expériences répétitives visent à reproduire et à comprendre les observations géophysiques récentes liées aux séismes au ralenti ou à la dynamique d'un processus de rupture lors d'une défaillance d'une interface.

**Le projet multidisciplinaire RESOLVE comprend donc de nouveaux développements méthodologiques, un traitement massif des données et une combinaison d'expériences en laboratoire et sur le terrain.**

Au cours des dernières années, de vastes domaines scientifiques impliqués dans la collecte de données à grande échelle ont commencé à connaître une révolution technologique. C'est particulièrement vrai pour les sciences de la Terre, et en particulier la sismologie et la géophysique, qui peuvent désormais bénéficier de l'acquisition continue de données par des réseaux très denses de sismomètres, qui peuvent parfois comprendre plus de 10.000 capteurs. Ces déploiements de capteurs étaient presque inconcevables il y a seulement 10 ans et, jusqu'à tout récemment, ils se limitaient à des expériences géophysiques incroyablement coûteuses et financées par les industries pétrolière et gazière. Cependant, les progrès technologiques ont récemment changé la donne et les établissements universitaires peuvent maintenant enregistrer des données expérimentales avec des milliers de capteurs sismiques à un prix abordable (voir le magazine Science, août 2014). Pour aller plus loin, nous pourrions même en être à une étape critique, où la qualité incroyable des mesures géophysiques dépasse notre compréhension des processus physiques sous-jacents en sciences de la Terre.

En rassemblant la géophysique et la physique dans une même approche méthodologique, RESOLVE a clairement l'intention de jeter les bases de la géophysique moderne. Deux ingrédients principaux rendent possible aujourd'hui ce projet ambitieux. Tout d'abord, l'accès à plusieurs ensembles de données révolutionnaires à partir de distributions spatiales denses de capteurs sismiques, et dans leur acquisition continue. D'autre part, le laboratoire développé à ISTerre avec des acquisitions ultra-rapides multivoies qui permettent la reproduction à l'échelle du laboratoire des processus physiques observés à grande échelle. Il y a différentes façons de tirer profit de ces nouveaux ensembles de données massifs. La façon la plus simple est de procéder par des analyses statistiques : lorsqu'elles sont traitées avec des méthodes classiques, de nouvelles données ajoutent de la redondance aux données existantes, afin de réduire les biais ou les incertitudes dans l'image finale. Il y a effectivement un gain ici, mais il évolue lentement comme la racine carrée de la quantité de données. Une autre façon, plus difficile, est de rechercher de nouvelles informations à l'intérieur des données, en utilisant, par exemple, des méthodes avancées de traitement de signal ou d'intelligence artificielle. Le gain devient alors linéaire avec l'augmentation des données, et les images peuvent potentiellement atteindre une résolution inattendue.

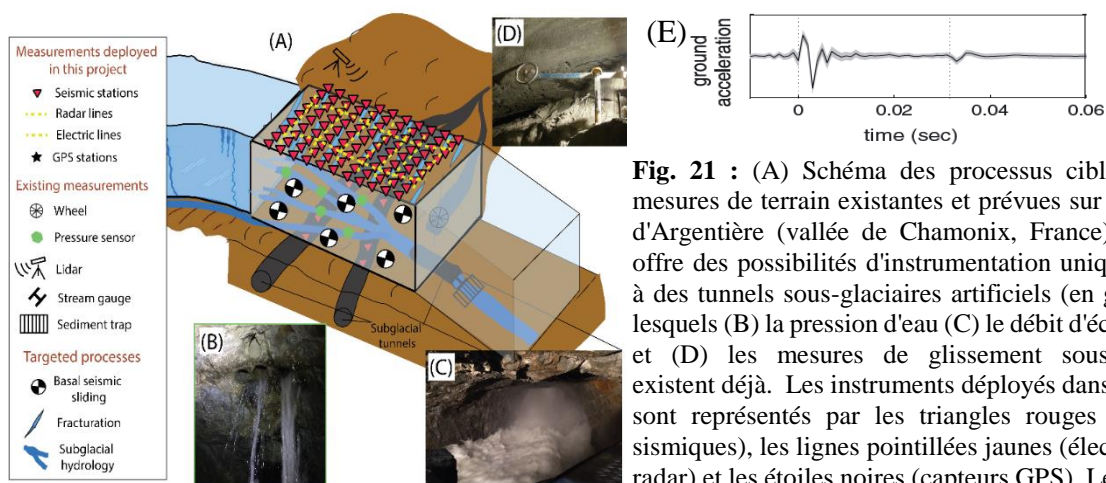
C'est de cette façon que nous avons abordé le premier volet du projet RESOLVE avec une expérience fascinante sur le glacier d'Argentière à 2500 m d'altitude impliquant plus de 20 scientifiques de communautés différentes (voir le film « grand public » effectué par le CNRS image sur <https://resolve.osug.fr/spip.php?article30> et diffusé dans le cadre des Rencontres Montagne et Sciences en nov. 2018 au Palais des Sports de Grenoble).

Les calottes glaciaires, les glaciers de montagne et la glace de mer sont des composantes majeures de la surface de la Terre et sont donc des acteurs importants dans des domaines aussi variés que la climatologie, l'océanographie et la géodynamique de la terre solide. La structure géométrique et la mécanique des objets glaciaires sont les deux principaux contrôles de la dynamique des glaciers. Ce sont donc les deux principales propriétés fondamentales qu'il faut bien surveiller et comprendre pour aborder de nombreuses questions scientifiques d'intérêt général en sciences de la Terre, comme par exemple : comment la cryosphère contrôle-t-elle les bilans hydrométriques et les échanges thermodynamiques dans un climat en évolution rapide ? ou encore : comment les glaciers contrôlent-ils l'érosion crustale et donc potentiellement la

tectonique en orogénèse montagneuse ? Jusqu'à présent, ces questions restent débattues en grande partie parce qu'il n'existe toujours pas de contraintes d'observation directes sur les structures et la dynamique des glaciers.

L'objectif de notre expérience sur le glacier d'Argentière est de combler ce manque de connaissances en utilisant la sismologie en réseau dense pour fournir de nouvelles contraintes sur les structures et la mécanique de la glace dans les environnements naturels des glaciers de montagne. Des études sismiques récentes de la cryosphère ont montré que des quantités physiques clés spécifiques peuvent être limitées par la sismologie, comme par exemple la pression de l'eau dans les sédiments sous-jacents aux glaciers (Mordret et al., 2016) et dans les canaux sous-glaciaires (Gimbert et al., 2016), ou les processus de friction à l'interface glaciaire - substrat rocheux (Helmstetter et al., 2015). Bien que toutes ces études aient démontré avec succès l'utilité de la sismologie en glaciologie, leurs résultats quantitatifs sont restés limités en raison du manque de résolution spatio-temporelle des observations sismiques, qui étaient souvent effectuées avec un nombre très limité de capteurs (un à quelques-uns) qui ne permettaient pas de mesurer avec précision la dynamique spatiale et temporelle des processus de friction mis en jeu.

Dans le cadre de RESOLVE, nous avons utilisé un réseau sismique très dense composé de 100 instruments sismiques de nouvelle génération (capteurs sans fil avec 30 jours d'autonomie) pour surveiller un glacier avec une résolution spatio-temporelle inégalée. Le site ciblé, qui fut instrumenté d'avril à juin 2018 (Fig. 21), est un plateau du glacier d'Argentière (à 2500 m d'altitude dans le massif du Mont Blanc) situé entre deux barrières de séracs, site bien connu des scientifiques grenoblois pour avoir fait l'objet de nombreuses études dans le passé.



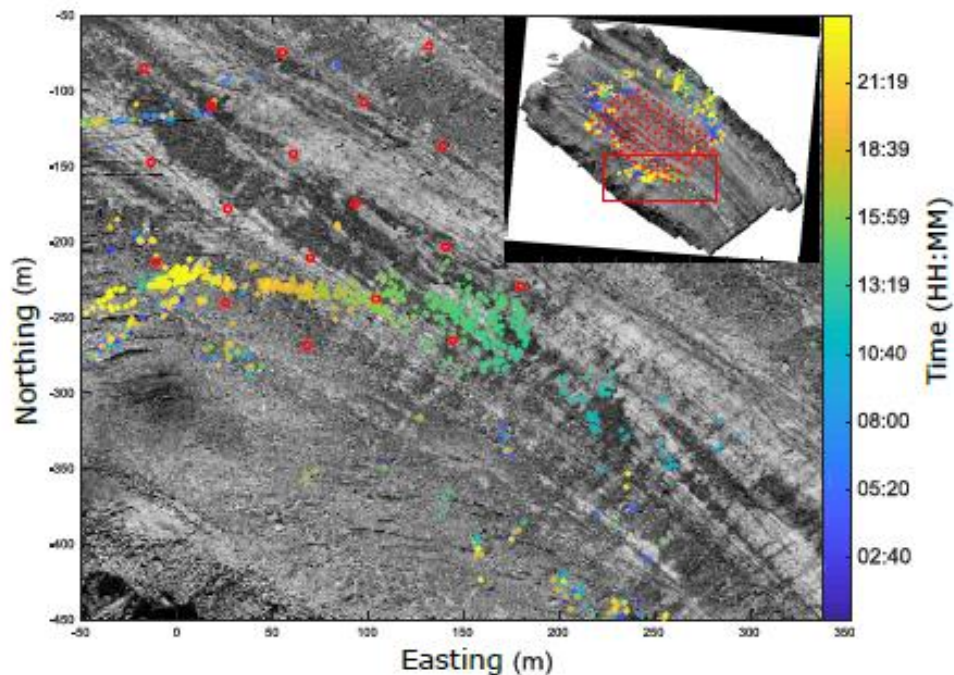
**Fig. 21 :** (A) Schéma des processus ciblés et des mesures de terrain existantes et prévues sur le glacier d'Argentière (vallée de Chamonix, France). Ce site offre des possibilités d'instrumentation uniques grâce à des tunnels sous-glaciaires artificiels (en gris) dans lesquels (B) la pression d'eau (C) le débit d'écoulement et (D) les mesures de glissement sous-glaciaire existent déjà. Les instruments déployés dans ce projet sont représentés par les triangles rouges (capteurs sismiques), les lignes pointillées jaunes (électriques et radar) et les étoiles noires (capteurs GPS). Le panneau (E) montre un exemple de données sismiques associées à la fracturation des glaciers à Argentière (Helmstetter et al., 2015).

Des techniques sismologiques émergentes, mises au point à l'origine pour étudier la structure et la dynamique de la croûte terrestre, telles que le Double Beamforming (Roux et al., 2016) et le traitement d'antenne (Corciulo et al., 2012) sont maintenant appliquées à l'ensemble des données enregistrées (Fig. 22).

Plus spécifiquement, nous analysons les formes d'ondes et le bruit sismique ambiant pour récupérer la structure et les sources mécaniques des glaciers, ainsi que leurs changements spatio-temporels aux différentes échelles d'intérêt en glaciologie (quelques minutes à plusieurs



semaines). Les développements sismiques spécifiques à venir impliquent l'analyse des ondes guidées et de leur contenu d'information en termes de structure glaciaire, ainsi que l'analyse des sources de bruit de fond et de leurs relocalisations spatio-temporelles à partir de techniques de formation de voies, basées sur le champ d'onde élastique.



**Fig. 22 :** Exemple de sources sismiques déclenchées par les contraintes/déformations au sein du glacier et se propageant le long d'une crevasse le 25 avril. Les points de couleur correspondent à la position de la source localisée avec le réseau de capteurs sismiques, leurs couleurs correspondent à l'heure de la journée. L'insert montre une vue globale des évènements micro-sismiques détecté. L'image principale correspond au zoom effectué sur le rectangle rouge. Les cercles rouges représentent la position des capteurs sismiques.

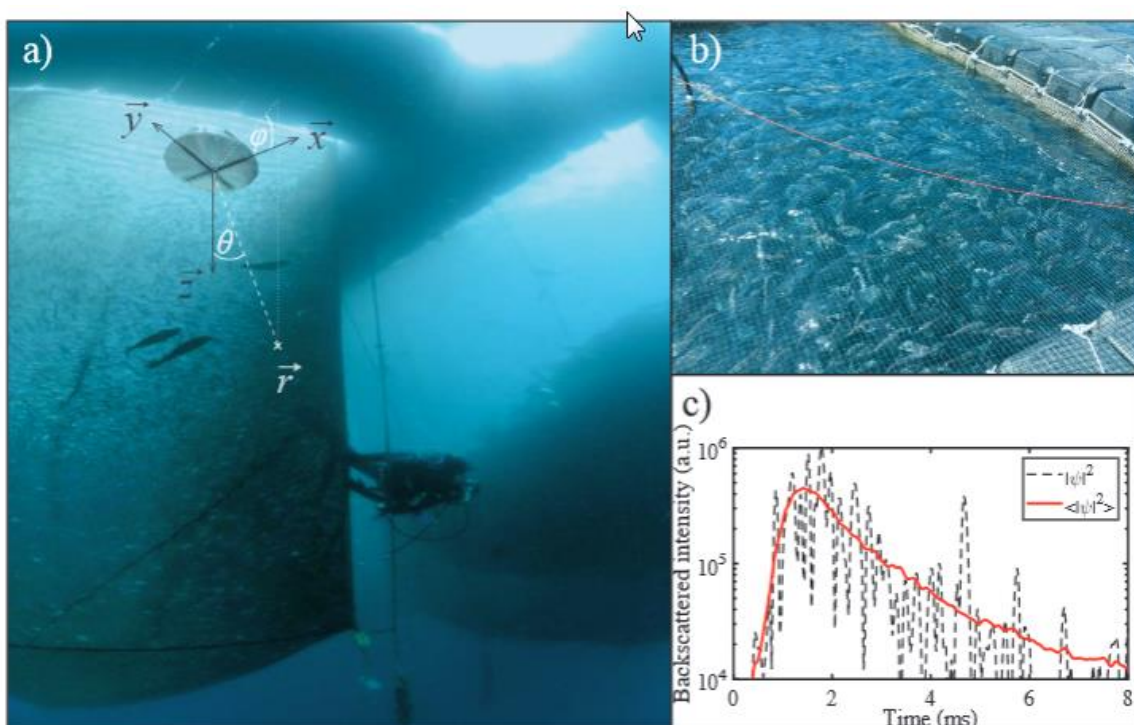
## 2- **Projet VIBEA: Mesoscopic wave physics with a dense school of fish in a sea farm cage.**

La diffusion des ondes dans les milieux complexes est un sujet interdisciplinaire d'une grande importance pratique dans des domaines scientifiques tels que la physique de la matière condensée, l'optique, la sismologie, l'imagerie médicale, etc. Dans de nombreuses situations, différents types d'ondes présentent un comportement très similaire lorsqu'elles se propagent dans un milieu aléatoirement inhomogène et désordonné. Les phénomènes dits mésoscopiques qui proviennent des interférences d'ondes diffusées, rendues possibles par la cohérence de phase que les ondes préservent malgré le désordre, sont d'un intérêt particulier. Les phénomènes mésoscopiques de diffusion des ondes sont vitaux pour de nombreuses applications pratiques, telles que l'électronique miniaturisée moderne, l'imagerie médicale et sismique et les essais non destructifs de matériaux industriels importants.

Cependant, en dépit de ce large éventail de phénomènes mésoscopiques, la diffusion multiple est souvent considérée comme un obstacle à la caractérisation des milieux désordonnés. L'estimation des populations de poissons est l'un de ces défis car la diffusion multiple des ondes acoustiques dans les bancs denses met en difficulté les méthodes habituelles de comptage des poissons (Simmonds and Mac Lennan, 2005). Le but du projet VIBEA est de montrer que la diffusion acoustique dans les bancs de poissons permet d'observer divers phénomènes d'ondes

mésoscopiques avec une précision sans précédent. La comparaison des résultats expérimentaux avec la théorie donne les propriétés de diffusion acoustique qui peuvent être utilisées pour estimer la taille typique des poissons et la densité des bancs de poissons.

En pratique, la forte diffusion des ondes acoustiques permet d'observer des phénomènes mésoscopiques tels que la rétrodiffusion cohérente, les corrélations de champ et d'intensité, les fluctuations de la densité locale des états, et motive le premier objectif du projet VIBEA : une étude des effets des interférences mésoscopiques dans la diffusion multiple du champ d'ondes enregistré sur un réseau acoustique formé de deux antennes linéaires en croix de Mills. D'autre part, nous proposons d'utiliser les propriétés statistiques de l'échographie diffusée pour sonder et surveiller le comportement des poissons dans un banc dense. Ce deuxième objectif est motivé par des applications potentielles dans la science du comportement animal et dans l'industrie aquacole.



**Fig. 23 :** Photos sous-marines (a) et de surface (b) d'une cage en haute mer utilisée dans le cadre de l'étude de la diffusion multiple au sein d'un banc de poissons dans le cadre du projet VIBEA. (c) Intensité rétrodiffusée suite à un tir acoustique impulsionnelle (noise) et moyennée sur 10000 tirs successifs (rouge), mettant en évidence la dispersion temporelle associée au processus de diffusion des ondes acoustiques au sein du banc.

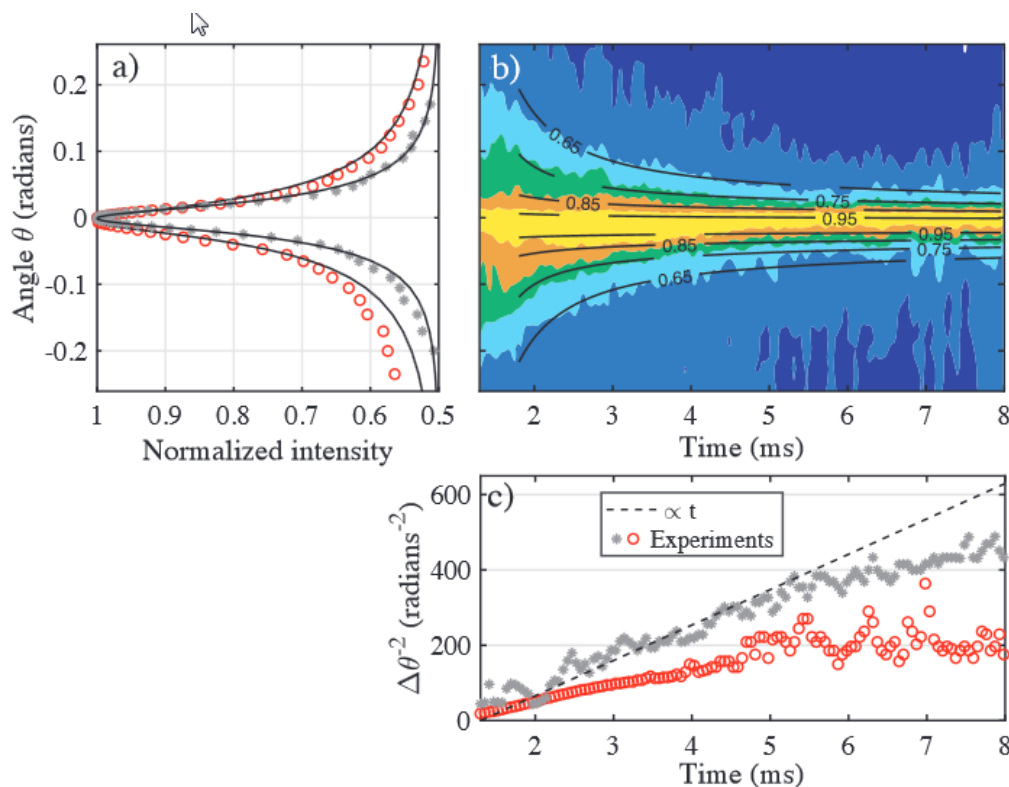
Pour s'assurer le contrôle du banc de poissons, opération délicate et aléatoire pour un banc en pleine mer, nous effectuons des mesures acoustiques dans de grandes cages à poissons ( $\sim 8 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ ) disponibles dans les fermes piscicoles en zone littorale (Fig. 23). Une cage contient généralement plusieurs dizaines de milliers de poissons à une densité moyenne de 10 à 50 poissons par  $\text{m}^3$ , la masse individuelle d'un poisson allant de 50 g pour les petits poissons lorsque la cage est peuplée à 500 g par individu quelques mois plus tard lorsqu'elle est récoltée avec des poissons adultes. Ces chiffres correspondent à des fractions volumiques de poissons allant de 1 % à 10 %.

Les mesures sont répétées plusieurs milliers de fois avec un intervalle de 35 ms entre des impulsions acoustiques consécutives. Le mouvement naturel du poisson à une vitesse de l'ordre de 5 cm/s est suffisamment lent pour que le poisson puisse être considéré comme immobile

pendant une acquisition. En même temps, de déplacement lent produit des configurations de poissons indépendantes pour des mesures suffisamment séparées dans le temps, ce qui nous fournit un grand nombre de mesures statistiquement indépendantes.

Pour une configuration de désordre donnée, l'intensité rétrodiffusée (Fig. 23c) présente d'importantes fluctuations temporelles découlant des différentes contributions de diffusion au sein du banc. La "coda acoustique" qui en résulte (en analogie avec la coda des ondes sismiques) est donc une signature directe de la diffusion multiple. Dans cette configuration, les méthodes classiques d'estimation de la biomasse en supposant un régime de diffusion simple, comme le comptage individuel de cibles (lorsque l'identification de cibles bien séparées est possible) ou l'écho-intégration (en supposant une relation linéaire entre la densité et l'énergie rétrodiffusée) échouent. Il faut donc trouver une autre observable physique qui s'appuie sur la diffusion multiple au sein du banc.

L'effet mésoscopique par excellence qui porte cette signature et qui a été mesuré pour la lumière (Van Albada and Lagendijk, 1985; Wolf and Maret, 1985), le son (Tourin et al, 1997), la matière (Jendrzejewski et al, 2012) et les ondes sismiques (Larose et al, 2004) est la rétrodiffusion dite cohérente (CBS ou Coherent Back Scattering). Elle est due à l'interférence constructive des ondes suivant des paires de trajets inversés dans le temps et se manifeste par le doublement de l'intensité moyenne diffusée dans une plage angulaire étroite autour de la direction de rétrodiffusion (Akkermans et al, 1986).



**Fig. 24:** (a) Profils de CBS stationnaires, (intégrés dans le temps), et dynamiques (b). Les symboles gris correspondent à des expériences en milieu faiblement diffusant tandis que les symboles rouges résultent d'expériences en régime fortement diffusant. L'évolution temporelle correspondante de la largeur du CBS (c) est comparée à un exemple de comportement diffusif classique en ligne noire pointillée.

Un exemple de mesures de CBS pour les bancs de poissons est présenté sur la Fig. 24a, ainsi qu'un ajustement théorique fournissant la valeur du libre parcours moyen de transport  $l^*=1,7$

cm (à comparer avec la longueur d'onde acoustique  $\lambda=1$  cm) dans les cages à basse et grande densité respectivement. Une fois de plus, la faible valeur de  $l^* \sim \lambda$  confirme la forte diffusion des ondes acoustiques dans les bancs de poissons. L'intérêt du libre parcours moyen de transport libre réside dans sa dépendance à la fois avec la densité des poissons et avec leur propriété de diffusion acoustique.

Une mesure complémentaire intéressante porte sur la façon dont la largeur du CBS diminue avec le temps (Tourin et al, 1997). Nos mesures du CNS en régime dynamique dans les bancs de poissons (Fig. 24b) présentent un transport sub-diffusif de l'intensité acoustique, c'est-à-dire un ralentissement du processus de diffusion dans le temps (Cobus et al, 2016), la largeur du pic tendant vers une valeur constante très inférieure à la limite imposée par la résolution angulaire de l'antenne. Dans le cas des bancs de poissons à plus forte densité, la saturation est plus prononcée (Fig. 24c). Cela suggère que la longueur de localisation (Sheng, 1995) est plus courte dans ce cas, l'échelle caractéristique des effets de localisation étant fortement dépendante du désordre (nombre et taille des poissons) à proximité de la transition de localisation. En d'autres termes, le passage du régime diffusif au régime localisé peut être un bon indicateur pour évaluer la fraction volumique de poissons dans les cages en mer.

En conclusion, les bancs de poissons denses diffusent fortement les ondes acoustiques, ce qui conduit à la présence de diffusion multiple qui peut être décrite par un libre parcours moyen de transport de l'ordre de la longueur d'onde. Des expériences à long terme (suivi de plusieurs mois sur une seule cage) sont en préparation afin d'étudier l'effet de la croissance des poissons sur la transition du régime de transport du régime diffusif à sub-diffusif ou même localisé dans les bancs de poisson.

## Références principales

E. Akkermans, P.E. Wolf, and R. Maynard, *Phys. Rev. Lett.* 56, 1471 (1986).

L.A. Cobus, S.E. Skipetrov, A. Aubry, B.A. van Tiggelen, A. Derode, and J.H. Page, *Phys. Rev. Lett.* 116, 193901 (2016).

Corciulo, M., P. Roux, M. Campillo, D. Dubucq and W. A. Kuperman (2012), Multiscale matched-field for noise-source localization in exploration geophysics, *Geophysics* 77(5), doi : 10.1190/GEO2011-0438.1

Gimbert, F., V. C. Tsai, J. M. Amundson, T. C. Bartholomaeus, and J. I. Walter (2016), Subseasonal changes observed in subglacial channel pressure, size, and sediment transport, *Geophys. Res. Lett.*, 2016GL068337, doi:10.1002/2016GL068337.

Helmstetter, A., B. Nicolas, P. Comon, and M. Gay (2015), Basal icequakes recorded beneath an Alpine glacier (Glacier d'Argentière, Mont Blanc, France): Evidence for stick-slip motion?, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 120(3), 2014JF003288, doi:10.1002/2014JF003288.

F. Jendrzejewski, K. Müller, J. Richard, A. Date, T. Plisson, P. Bouyer, A. Aspect, and V. Josse, *Phys. Rev. Lett.* 109, 195302 (2012).

E. Larose, L. Margerin, B. A. van Tiggelen, and M. Campillo, *Phys. Rev. Lett.* 93, 048501 (2004).

Mordret, A., T. D. Mikesell, C. Harig, B. P. Lipovsky, and G. A. Prieto (2016), Monitoring southwest Greenland's ice sheet melt with ambient seismic noise, *Science Advances*, 2(5), e1501538, doi:10.1126/sciadv.1501538.

Roux P., Moreau L., Lecointre A., Hillers G., Campillo M., Ben-Zion Y., Zigone D. and Vernon F. (2016), A methodological approach toward high-resolution surface wave imaging of the San Jacinto Fault Zone using

ambient-noise recordings at a spatially dense array, *Geophysics Journal International*, 206, 980-992.

P. Sheng, *Introduction to Wave Scattering, Localization and Mesoscopic Phenomena* (Academic Press, San Diego, 1995).

J. Simmonds and D. MacLennan, *Fisheries Acoustics: Theory and Practice*, 2nd edition (Blackwell Science, Oxford, 2005).

A. Tourin, A. Derode, P. Roux, B.A. van Tiggelen, and M. Fink, *Phys. Rev. Lett.* 79, 3637 (1997).

M.P. van Albada and A. Lagendijk, *Phys. Rev. Lett.* 55, 2692 (1985).

P.E. Wolf and G. Maret, *Phys. Rev. Lett.* 55, 2696 (1985).