



Institut de physique

## RENOUVELLEMENT D'UN GROUPEMENT DE RECHERCHE

**Intitulé du GDR : Contrôle des Ondes en Milieu complexe**

**Acronyme : COMPLEXE**

**Équipe de direction** (directeur/directrice/adjoint/adjointe...)

Directeur : Nicolas Cherroret (LKB, UMR 8552, Paris)

Co-directeur : Alexandre Aubry (Institut Langevin, UMR 7587, Paris)

**Institut de rattachement principal et instituts secondaires :**

Institut principal : INP

Institut secondaire : INSIS

**Section(s) de rattachement du comité national en vue d'une évaluation :**

Sections principales : 05

Sections secondaires : 04, 08, 09, 03

### BILAN SCIENTIFIQUE

*Les réalisations du GDR sont soulignées.*

*A/ Événements scientifiques organisés par le GDR entre 2018 et 2022*

#### **1- Ecole thématique 'Transport, mésoscopie et imagerie des ondes en milieu complexe'**

- Organisée les 27 mai - 2 juin 2018 au Centre d'Etudes Scientifiques de Cargèse
- 57 participants non intervenants, 19 intervenants et 2 organisateurs (A. Aubry, N. Cherroret)



Cette école d'été du GDR, destinée en priorité aux doctorants et post-doctorants travaillant sur la physique des ondes en milieu complexe, a inclus 11 cours généralistes complétés par quelques séminaires sur des thématiques variées du GDR. L'effort de pédagogie fait par la plupart des conférenciers a été reconnu par les participants.

#### **2- Workshop 2019 du GDR**

- Organisé les 1-2 avril 2019 à l'Institut Langevin à Paris.
- 70 participants non intervenants, 13 intervenants et 2 organisateurs (A. Aubry, N. Cherroret)



Ce premier workshop généraliste du GDR a permis à 13 jeunes chercheurs de la communauté de présenter leurs travaux aux cours de séminaires de 30 minutes. Une session poster et un dîner ont également été organisés.

### **3- Ecole doctorale 'Imaging in Wave Physics : Multi-Wave and Large Sensor Networks'**

- Co-organisée avec l'Institut Langevin les 23 - 27 septembre 2019 au Centre d'Etudes Scientifiques de Cargèse.
- 69 participants non intervenants, 20 intervenants et 3 organisateurs (A. Aubry, R. Pierrat, S. Popoff)



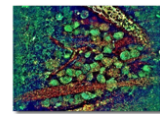
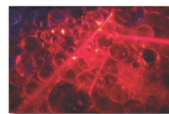
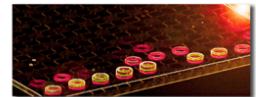
Cette école d'été a été organisée à l'initiative de l'Institut Langevin à Paris, mais avec le concours fort du GDR Complexe tant pour l'organisation que pour le financement. Cette école s'est focalisée sur le problème de l'imagerie en milieu complexe.

### **4- Workshop 2020 du GDR**

- Organisé les 30 novembre - 2 décembre 2020 en ligne
- 101 participants non intervenants, 27 intervenants et 2 organisateurs (A. Aubry, N. Cherroret)

GdR Complexe  
Annual Workshop  
Online, Nov. 30 - Dec. 2, 2020

Contrôle  
des Ondes  
en Milieu  
comPLEXE



L'organisation de ce workshop généraliste, initialement prévu à Paris, a été bouleversée par la crise sanitaire et il a fallu le convertir en un format en ligne. Cette conversion a néanmoins eu des avantages, puisque le nombre de participants a pu être beaucoup augmenté en raison de l'absence de contrainte de place, et l'audience a pu être plus internationalisée. Le résultat a été un beau succès, puisque l'audience a été excellente, avec un nombre important d'orateurs présentant leurs travaux sur la plupart des thématiques couvertes par le GDR.

### **5- Ecole thématique WACO 'Waves in Complex Media'**

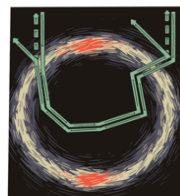
- Initialement prévue les 14 - 24 avril 2020 au centre de Physique des Houches.
- Annulée au dernier moment en raison du confinement (organisateurs A. Aubry, N. Cherroret, S. Gigan). L'école a été reportée à **septembre 2023**.



Cette école thématique du CNRS de 2 semaines a été intégralement organisée pendant plusieurs mois par le GDR Complexe, en partenariat avec la SFO. Le confinement de 2020 nous a malheureusement contraints à l'annuler au dernier moment. L'école a d'abord été reportée en 2022, mais des travaux aux Houches nous ont imposé un second report. Finalement, cette école aura lieu en septembre 2023 aux Houches. Elle comprendra 6 cours généraux d'une durée de 6 à 7 heures dispensés par des spécialistes des ondes en milieu complexe, une douzaine de séminaires d'application d'1 heure et deux sessions poster répartis sur 2 semaines.

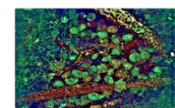
### **6- Workshop 2021 du GDR**

- Organisé les 13 - 15 décembre 2021 à l'Institut Langevin à Paris.
- 57 participants non intervenants, 24 intervenants, 2 organisateurs (A. Aubry, N. Cherroret).



GdR Complexe  
Annual Workshop  
Paris, December. 13 - 15, 2021

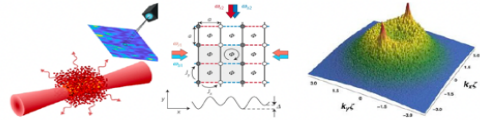
Contrôle  
des Ondes  
en Milieu  
comPLEXE



Cette rencontre annuelle du GDR a eu le même esprit que les précédentes : permettre à de jeunes chercheurs du GDR de présenter leurs travaux à l'occasion de séminaires. Elle a pu être organisée de justesse en présentiel, avant la mise en place de mesures de restriction liées à la crise sanitaire.

### **7- Mini-colloque 'Interactions, Topology and Symmetries in Disordered Systems'**

- Organisé les 24 - 25 août 2021 dans le cadre des 17èmes Journées de la Matière Condensée.  
- 40 participants non intervenants, 15 intervenants, 3 organisateurs (N. Cherroret, J.-F. Clément, A. Rançon, R. Chicireanu)



Ce mini-colloque spécialisé sur la physique quantique des milieux désordonnés a été directement organisé et financé par le GDR Complexe, suite à l'initiative de J.-F. Clément, R. Chicireanu et A. Rançon (membres du GDR au laboratoire PhLAM). Il a permis de consacrer deux demi-journées complètes aux problèmes fondamentaux de topologie, de symétrie et d'interactions, qui sont en plein essor dans les systèmes quantiques d'atomes froids.

### **7- Wavinaires 'Questions ouvertes'**

La SFO, le GDR Ondes et le GDR Complexe ont mis en place le Wavinaire 'Questions Ouvertes' en 2022. Ces séminaire d'1h30 sont destinés aux étudiants, post-doctorants et ingénieurs ou chercheurs, et se tiennent en ligne trois fois par an. Chaque Wavinaire est organisé autour d'une publication connue à l'avance, qui permet d'introduire une thématique transverse sur une notion de base nécessaire à la compréhension de l'article. Ce cours est donné par un étudiant qui présente brièvement le principal résultat de l'article. Il est suivi par une mise en perspective critique réalisée par un ou deux experts qui commentent les retombées industrielles ou académiques. Le Wavinaire se termine par des questions et une discussion libre.

Deux Wavinaires ont déjà été organisés :

- Sur les ondes dans les milieux temporellement variables, 12 janvier 2022 (1h30)
- Sur les métasurfaces et le contrôle de la phase par des résonateurs, 15 juin 2022 (1h30)

Un troisième Wavinaire est prévu en fin d'année 2022.

### **8- Projet : workshop 2022 du GDR**

Cet événement constituera la rencontre annuelle du GDR au terme de ses 5 ans. Il sera organisé par N. Cherroret et A. Aubry à Paris, entre septembre et décembre 2022.

### *B/ Evénements scientifiques financés par le GDR entre 2018 et 2022*

Pour tous ces événements, le GDR a principalement financé l'organisation de missions pour les doctorants.

**1- La conférence internationale 'Waves Côte d'Azur'**, qui s'est déroulée du 4 au 7 juin 2019 (organisateur S. Barland) : <http://wavescotedazur.org/>. Cette conférence a impliqué de nombreuses sessions thématiques et des sessions plénières plus générales impliquant des orateurs internationalement reconnus dans des domaines comme les ondes non linéaires en milieu artificiel ou en biologie, la turbulence ou les ondes en milieu désordonné. Elle a réuni près de 250 participants de 16 pays différents.

**2- L'Ecole pré-doctorale des Houches 'Interaction of light and cold atoms'**, qui s'est déroulée les 30 septembre - 11 octobre 2019 aux Houches (organisateurs M. Hugbart, R. Kaiser, G. Quéméner et P. Verkerk) : <https://coldatoms2019.sciencesconf.org/>. Cette école avait pour but de fournir aux étudiants les connaissances nécessaires pour débiter une thèse en lien avec l'interaction entre la lumière et les gaz d'atomes. Ce sujet, et notamment ses liens avec la propagation des ondes dans le désordre, la localisation d'Anderson et les effets collectifs, est un exemple de thématique interdisciplinaire au sein du GDR Complexe.

**3- Le workshop 'Disorder-and-Chaos'**, qui s'est déroulé les 14 et 15 novembre 2019 au LPMCM à Grenoble (organisateurs S. Skipetrov, B. van Tiggelen et A. Joye), a impliqué une douzaine d'orateurs pour travailler sur des questions fondamentales portant sur les systèmes désordonnés et chaotiques (diffusion de la lumière dans les milieux désordonnés et dans les gaz, mésoscopie des ondes, renversement du temps avec les ondes acoustiques, chaos ondulatoire, propriétés mathématiques de la localisation d'Anderson, localisation des ondes acoustiques, ondes de matière désordonnées etc.)

**4- L'Ecole pré-doctorale 'Quantum Technology with light and matter'**, qui s'est déroulée les 13 - 18 septembre 2020 aux Houches, <https://www.lkb.upmc.fr/leshouches2020/> (organisateurs Q. Glorieux et A. Browaeys). Cette école, destinée aux étudiants débutant une thèse autour de l'interaction lumière - matière, a inclus plusieurs cours en lien avec les thématiques du GDR Complexe, notamment sur la diffusion de la lumière dans les milieux désordonnés et sur les interactions dipôle-dipôle dans le transport de la lumière dans les gaz d'atomes.

**5- Le workshop 'Wave propagation and control in complex media'**, organisé par R. Pierrat, F. Lemoult, M. Fink et S. Popoff s'est déroulé en ligne du 28 au 30 juin 2021 (cet événement était initialement une école thématique prévue à Cargèse, mais a dû être converti en ligne du fait de la pandémie). Il a attiré près de 60 auditeurs.

**6- Soutien au séminaire inter-laboratoire 'Théorie Quantique de la Matière'**, organisé à Sorbonne Université (<http://quantummattertheory.fr>). Ce séminaire a été mis en place en septembre 2021 à Sorbonne Université (Paris), co-organisé par C. Brun, M. Casula, N. Cherroret, J.-N. Fuchs et B. Oblak. Le GDR Complexe a financé la participation d'un orateur sur la thématique de la localisation à N corps dans les gaz quantiques désordonnés.

**7- Le workshop 'Collective Scattering of Light'**, organisé par M. Hugbart, R. Bachelard et R. Kaiser. Ce workshop, centré sur la thématique des effets collectifs de la lumière dans les milieux atomiques denses, s'est déroulé dans un format hybride en ligne/présentiel à Porquerolles, les 12 - 17 septembre 2021 (report de 2020 dû à la pandémie). Il a impliqué 28 orateurs et une cinquantaine de participants.

**8- Prévu : Le Mini-colloque 'Superfluidity, vortices and quantum turbulence in atomic systems'**, organisé par R. Chicireanu, I. Danaila et F. Chevy, aura lieu le 23 août 2022 dans le cadre des journées de la Matière Condensée 2022.

**9- Prévu : Le Workshop 'Collective Scattering of Light 2022'**, organisé par R. Bachelard, M. Hugbart et R. Kaiser aura lieu à Porquerolles les 9 - 14 octobre 2021.

**10- Prévue : L'école thématique 'Waves in Complex Media, from spatial to temporal degrees of freedom'**, organisée par F. Lemoult, R. Pierrat et S. M. Popoff aura lieu au Centre d'Etudes Scientifiques de Cargèse les 12 - 16 septembre 2022.

## BILAN DES ACTIONS MENÉES

Pendant la période 2018 - 2022, le GDR a organisé principalement des événements généralistes ayant pour but de favoriser les échanges entre les différentes communautés pour faire émerger de nouvelles idées et des collaborations. Nous nous sommes aussi efforcés de favoriser un mélange générationnel pour encourager les échanges avec les jeunes chercheurs, et de mettre en avant en permanence l'interaction entre théoriciens et expérimentateurs. Ces spécificités, de même que le côté interdisciplinaire de ces rencontres, ont été très appréciés. Concernant les écoles d'été organisées, le caractère pédagogique des cours proposés a été plébiscité.

Le GDR a en revanche organisé peu d'événements plus spécialisés, qui auraient peut-être permis de pousser plus loin la logique du GDR visant à encourager l'émergence de nouvelles thématiques entre communautés proches. C'est un point que nous tenterons d'améliorer pour les cinq prochaines années, grâce à l'organisation d'ateliers interdisciplinaires (voir partie 'Evolutions structurantes').

En dehors des échanges informels avec les différentes communautés du GDR, nous avons parfois eu l'impression de manquer de relais, notamment pour organiser des événements en dehors du cadre de la direction du GDR. Pour pallier cette difficulté, et aussi favoriser la remontée et la diffusion d'information entre les communautés et le GDR, nous proposons de mettre en place un bureau du GDR pour la nouvelle mandature, voir la partie 'Evolution organisationnelle'.

La pandémie de Covid-19, finalement, a sérieusement perturbé l'organisation des conférences, workshops et écoles du GDR en 2020 et 2021. Plusieurs événements ont été annulés ou convertis en ligne, souvent à la dernière minute. Le GDR Complexe a en particulier souffert d'un double report d'une école thématique du CNRS aux Houches ("Waves In Complex Media WACO", initialement prévue en

2020 et finalement reportée en 2023). Tous ces événements annulés ou reportés ont impliqué beaucoup d'investissement humain et ont induit du découragement.

## ÉVOLUTION DE LA COMMUNAUTÉ FRANÇAISE AVEC BILAN PARITÉ

Les équipes du GDR Complexe travaillant autour de l'imagerie, du contrôle et de la propagation des ondes en milieu complexe (le cœur des activités du GDR, voir partie 'Motivations scientifiques') sont pour beaucoup bien implantées depuis plusieurs années et expertes de leur domaine. La plupart ont donc peu évolué pendant les 5 dernières années, et feront naturellement partie du GDR lors du renouvellement. L'année 2020 a néanmoins vu l'arrivée de plusieurs équipes, comme celle de Marcel Filoche de l'Ecole Polytechnique, également coordinateur du projet de la fondation Simons sur la 'Localisation des Ondes' (<https://cse.umn.edu/wave>), au sein du GDR Complexe. Ces arrivées ont apporté de nouveaux enjeux scientifiques, comme discuté dans la partie 'Evolution des enjeux' ci-dessous.

Sur les thématiques plus interdisciplinaires, telles que la propagation des ondes dans les milieux variables temporellement ou non linéaires, ou la simulation des systèmes quantiques avec des ondes en milieu complexe, nous prévoyons un renouvellement un peu plus important des équipes pour les 5 prochaines années. Ce renouvellement est formalisé par la création d'un nouvel axe du GDR, discuté dans la partie 'Motivations scientifiques', directement inspiré par les évolutions scientifiques constatées entre 2018 et 2022, les échanges et collaborations qui ont eu lieu pendant les événements organisés par le GDR, et l'intérêt pour le GDR manifesté par des équipes qui en étaient jusqu'à présent extérieures.

Sur le plan de la parité, la communauté du GDR Complexe a certainement des progrès à faire, de nombreuses équipes du GDR étant peu féminisées. Au niveau de la direction du GDR, nous nous sommes efforcés de mettre le plus souvent possible le travail de chercheuses en avant au cours de tous les événements scientifiques que nous avons organisés. Au final, sur les 3 rencontres annuelles organisées en 2019, 2020 et 2021, les femmes ont contribué pour environ 20% des exposés et cours dispensés, avec un pourcentage légèrement supérieur pour les participants non intervenants de ces événements (doctorant(e)s et post-doctorant(e)s). Nous nous efforcerons d'améliorer ce rapport dans les années qui viennent, à chaque fois que cela sera possible.

## MOTIVATIONS SCIENTIFIQUES POUR JUSTIFIER D'UN RENOUVELLEMENT DU GDR

### 1- Consolidation des missions du GDR Complexe

Les missions principales du groupement sont :

- D'accélérer la recherche et le transfert de nouvelles connaissances dans le domaine de la **physique des ondes dans les milieux complexes**, en maintenant un équilibre fondamental/appliqué
- De stimuler le développement de nouvelles méthodes de contrôle et d'imagerie des ondes en milieu complexe
- De favoriser **l'interdisciplinarité autour des milieux complexes** en créant et renforçant les liens entre les communautés d'opticiens, d'acousticiens, de physiciens des milieux désordonnés/structurés et quantiques confrontés à des problèmes similaires

En particulier, nous insistons sur le fait que l'interdisciplinarité est la marque de fabrique de ce GDR (voir partie 'Positionnement' ci-dessous), qui se situe au croisement de plusieurs communautés scientifiques tout en maintenant des contacts forts avec les GDR environnants. Cela en fait, selon nous, une structure assez différente des autres, avec une communauté particulièrement diverse et dynamique où le cloisonnement thématique est finalement très limité (même si le GDR reste formé d'un 'noyau dur' autour de la propagation, du contrôle et de l'imagerie des ondes dans les milieux désordonnés). Nous pensons que ce caractère interdisciplinaire est une richesse, que nous souhaitons encore renforcer ces cinq prochaines années.

## 2- Grands axes des activités du GDR Complexe et leur dynamique scientifique

Nous présentons ci-dessous les grands axes du GDR Complexe, en insistant sur leur dynamique scientifique actuelle. Les deux premiers axes regroupent des sujets déjà bien présents au sein du GDR, tandis que le troisième regroupe des thématiques plus interdisciplinaires. Les thématiques émergentes ou en évolution forte au sein de ces axes sont détaillées dans la partie 'Evolution des enjeux'.

### **Axe 1** **Contrôle et imagerie dans les milieux diffusants et biologiques**

Une problématique centrale étudiée par plusieurs équipes du GDR est l'imagerie optique profonde dans un environnement complexe (par ex. les milieux biologiques). Cette imagerie est rendue très difficile par le phénomène de diffusion multiple qui brouille tout signal au-delà de quelques centaines de microns. Même si d'autres techniques, utilisant par exemple les ultrasons, peuvent pénétrer plus profondément, leurs capacités en termes de résolution ou de contraste restent inférieures à la microscopie optique. Depuis la fin des années 2000, les méthodes de ' façonnage du front d'onde ' ont permis des avancées spectaculaires dans ce domaine. Elles consistent à manipuler le front d'onde pour contrôler la lumière dans le régime de diffusion multiple où aucun photon balistique (ceux utilisés dans les méthodes traditionnelles d'imagerie) n'est disponible. Elles permettent aujourd'hui d'imager avec une résolution inégalée en milieu complexe, de retrouver des objets cachés ou focaliser la lumière sous la limite de diffraction. Même si les techniques de contrôle du front d'onde sont aujourd'hui assez matures, le domaine reste très actif et ne montre pas de signe de ralentissement en termes d'innovation. Au contraire même, il bénéficie actuellement de fortes avancées technologiques récentes dans le domaine des modulateurs digitaux et détecteurs (SLM, caméras ultra-rapides, réseaux de détecteurs à photon unique etc.). Le domaine est également irrigué par la révolution récente de l'IA, avec l'émergence du deep learning qui permet de simplifier voire de limiter les contraintes du façonnage du front d'onde en termes de traitement du signal ou d'algorithmique.

### **Axe 2** **Propagation des ondes dans les systèmes désordonnés, structurés ou en interaction**

Au plan fondamental, le sujet de la propagation des ondes dans les milieux complexes est également au cœur du GDR Complexe. Il vise à développer des outils théoriques, statistiques et numériques pour caractériser le transport ondulatoire dans les milieux désordonnés, structurés ou non linéaires ou les systèmes complexes de la physique quantique. À noter que ces dernières années, une partie significative des études théoriques sur les milieux désordonnés ont fortement irrigué le champ pratique, une situation finalement peu commune en recherche fondamentale. Par exemple, la 'matrice de transmission', initialement utilisée dans le contexte de la théorie des matrices aléatoires ou plus généralement comme outil statistique pour caractériser un milieu désordonné, peut désormais être directement mesurée, et s'avère être un outil très polyvalent pour l'imagerie et le contrôle du front d'onde. Très récemment, plusieurs concepts fondamentaux de la physique des milieux désordonnés tels que l'effet mémoire, les canaux ouverts, la matrice de Wigner-Smith ou l'imagerie optique basée sur des états quantiques ont commencé à être exploités expérimentalement, et cette dynamique devrait se poursuivre dans les prochaines années.

Un autre problème fondamental exploré par plusieurs équipes du GDR Complexe est la localisation d'Anderson des ondes. Après une forte croissance dans les années 2000, ce sujet a atteint une certaine maturité et a connu un relatif déclin dans le contexte des systèmes désordonnés. La nouveauté, néanmoins, est venue de l'étude des milieux à l'interface onde-désordre, du domaine des systèmes quantiques désordonnés en interaction avec la localisation à N corps, et aussi, de façon plus inattendue, de la physique mathématique avec la théorie du paysage (voir partie 'Evolution des enjeux' ci-dessous pour plus de détails). À noter que bien que ces sujets soient aujourd'hui très étudiés, ils ne sont pratiquement pas représentés dans les autres GDR (les GDR Gaz Quantiques ou Méso, par exemple). L'existence du GDR Complexe est, de ce point de vue, importante.

Au niveau interdisciplinaire, mentionnons finalement le problème de la diffusion de la lumière dans les milieux denses, où les approches habituelles de la diffusion multiple ne fonctionnent plus et où il faut adopter une vision 'collective' de l'interaction de la lumière avec le milieu complexe. Ce sujet est aujourd'hui très étudié dans gaz quantiques d'atomes froids (constituant le milieu désordonné), mais s'avère aussi pertinent dans les matériaux désordonnés plus classiques. Il s'agit d'un exemple typique où le maintien des échanges entre communautés est crucial pour stimuler de nouvelles idées.

### Axe 3

## La simulation quantique avec les ondes en milieu complexe

Au cours de la période 2018 - 2022, nous nous sommes attachés à favoriser l'interaction entre physiciens travaillant sur les thématiques au cœur du GDR et des communautés plus en périphérie. Cet objectif s'est concrétisé par de nombreux échanges d'idées sur des sujets interdisciplinaires que nous structurons ici sous la forme d'un axe de recherche sur la simulation des systèmes quantiques avec des ondes. L'idée ici est d'exploiter la complexité d'un milieu pour mettre en évidence des phénomènes habituellement rencontrés dans le champ des systèmes quantiques de la matière condensée ou des atomes froids.

Récemment, plusieurs équipes du GDR ont par exemple illustré cette idée en considérant la possibilité de simuler des effets de matériaux topologiques ou de graphène avec de la lumière ou des micro-ondes dans des milieux diélectriques, en exploitant la géométrie de ces derniers et la nature vectorielle de la lumière. Dans un esprit similaire, il a été montré qu'en propageant de la lumière polarisée circulairement dans un milieu présentant du désordre anisotrope, il était possible d'observer un effet Hall de spin analogue à celui observé pour des électrons présentant un couplage spin-orbite en matière condensée.

Dans les milieux optiques non linéaires, des équipes du GDR ont développé de nombreux travaux mettant en évidence le concept de 'fluide de lumière'. Ceux-ci sont basés sur l'idée simple qu'un laser se propageant dans un milieu faiblement non linéaire dans la limite paraxiale est décrit par une équation d'onde identique à celle régissant le mouvement d'atomes ultra-froids en physique quantique. À partir de cette analogie, il devient possible d'envisager la mise en évidence de concepts tels que la superfluidité ou la condensation de Bose-Einstein des ondes classiques.

Pour terminer, plusieurs équipes du GDR travaillent depuis récemment sur la propagation des ondes dans les milieux dits 'variables temporellement', dans lesquels un paramètre du milieu est changé de manière plus ou moins rapide dans le temps. Cette notion est aujourd'hui explorée à la fois théoriquement et expérimentalement. Elle ouvre la voie à la réalisation de systèmes ondulatoires de Floquet et de cristaux temporels, ou encore à la simulation d'effets cosmologiques ou de physique statistique hors d'équilibre.

## ÉVOLUTION DES ENJEUX ET DES OBJECTIFS POUR JUSTIFIER D'UN RENOUVELLEMENT DU GDR

### 1- Evolutions au sein de l'Axe 1

Des évolutions importantes ont eu lieu dans le domaine du contrôle et de l'imagerie en milieu diffusant et biologique. Nous en donnons ici quelques exemples.

- Alors que l'approche matricielle de la propagation des ondes en milieu complexe avait jusqu'ici été étudiée principalement en transmission pour focaliser les ondes à travers les milieux diffusants, la matrice de réflexion est maintenant exploitée pour réaliser en post-traitement l'imagerie non-invasive et en profondeur des milieux complexes avec des applications qui vont de l'optique à la sismologie, en passant par l'échographie ultrasonore et l'imagerie radar [Figure 1]. Les techniques de façonnage du front d'onde et le concept d'imagerie matricielle commencent également à être étendues à la microscopie non-linéaire (fluorescence, bi-photonique, harmonique etc.), aux états quantiques de la lumière ainsi qu'à l'imagerie multi-ondes (photo-acoustique, acousto-optique, ultrasons-laser).

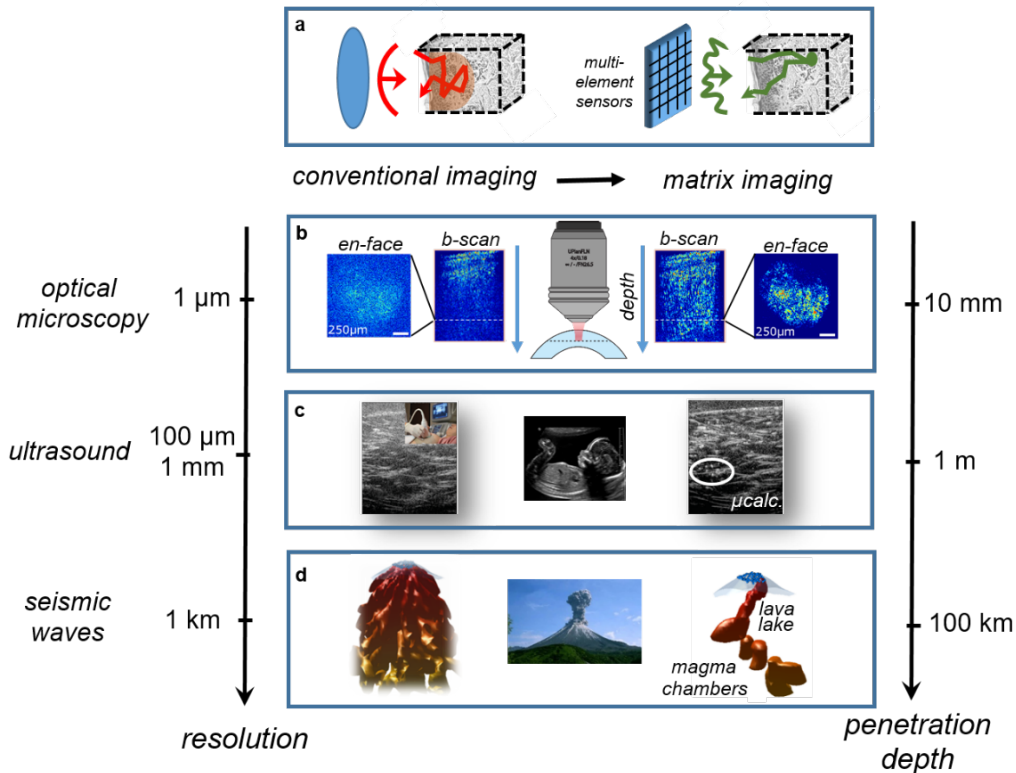


Figure 1 : Imagerie matricielle. (a) Les approches matricielles du contrôle du front d'onde permettent de focaliser les ondes multiples diffusées au sein des milieux complexes. Les applications vont de la microscopie en profondeur des tissus biologiques (b), à l'imagerie sismique des volcans (d), en passant par l'échographie ultrasonore et la détection de précurseurs du cancer du sein (c).

- Un autre exemple est la microscopie de localisation super-résolue [Fig.2(c)-(f)], développée initialement dans le cadre de l'imagerie de fluorophores en optique (prix Nobel 2014), et récemment transposée à l'échographie ultrasonore pour réaliser une image fonctionnelle à haute résolution du réseau vasculaire cérébral ou pour contrôler la fonte des glaciers en sismologie. Cet exemple montre l'intérêt de l'approche pluridisciplinaire promue par le GDR Complexe pour l'étude de la physique des ondes en milieu complexe.

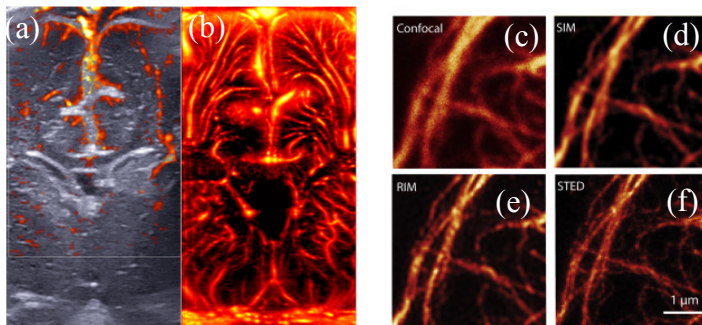


Figure 2 (a,b) Imagerie fonctionnelle d'un cerveau de nourrisson par échographie doppler classique et ultra-rapide [Physics for Medicine, Paris]. (c)-(f) Microscopie super-résolue fluorescente de la vimentine via différents types d'illumination structurées : (c) confocal, (d) Illumination structurée, (e) speckle aléatoire, (f) STED [T. Manget et al., Cells Reports Methods, 2022].

- L'imagerie des milieux dynamiques est également en plein essor dans différents domaines de la physique des ondes que couvre le GDR Complexe. En optique, les images dynamiques des tissus biologiques obtenues en OCT plein champ apportent un contraste révolutionnaire pour étudier le fonctionnement des cellules, le développement des cancers et l'action spécifique des médicaments. L'échographie ultra-rapide a permis des avancées incroyables en imagerie fonctionnelle du cerveau [Fig.2(a)-(b)]. Enfin en sismologie, l'imagerie dynamique des volcans et des zones de failles est cruciale pour la prédiction d'événements précurseurs des éruptions volcaniques et des séismes. Toutefois, les méthodes développées jusqu'à maintenant pour quantifier le mouvement dans milieux sondés restent relativement basiques (speckle tracking etc.) et les outils de l'approche matricielle, comme l'opérateur de Wigner-Smith généralisé, pourraient s'avérer particulièrement fructueux.



- Enfin, l'application des méthodes d'apprentissage pour le contrôle et l'imagerie des ondes est un champ de recherche en plein essor. Là encore, le GDR Complexe compte, par l'intermédiaire d'ateliers interdisciplinaires, faire phosphorer les chercheurs des ondes en milieu complexe avec des spécialistes de la science des données pour voir comment les modèles physiques de la propagation des peuvent être couplés aux méthodes d'apprentissage pour les télécommunications, l'imagerie ou la thérapie par les ondes.

## 2- Evolutions au sein de l'Axe 2

Dans le contexte fondamental de la propagation des ondes en milieu désordonné, structuré ou en interaction, plusieurs glissements se sont opérés ces dernières années.

- Tout d'abord, dans le cas des ondes classiques comme la lumière ou les ondes acoustiques, une partie de la communauté qui travaillait exclusivement sur les milieux désordonnés dans les années 2000 s'est récemment tournée vers l'étude des milieux à l'interface ordre-désordre. En particulier, plusieurs équipes théoriques du GDR ont développé une expertise des milieux hyper-uniformes ou quasi-cristallins présentant un ordre à longue portée avec, notamment, des résultats sur la localisation d'Anderson des ondes dans ce cadre. Ce domaine est actuellement en croissance, et celle-ci va a priori se poursuivre plutôt du côté expérimental, où tout reste à faire.
- Dans le contexte des systèmes quantiques désordonnés, le phénomène de localisation à N corps résultant de la présence simultanée de désordre et d'interactions a conduit à de nombreuses avancées théoriques majeures depuis 2010. Plusieurs chercheurs du GDR se sont tournés vers ce sujet depuis plusieurs années, même si cette thématique a été encore peu mise en avant au sein du GDR entre 2018 et 2022. Un enjeu du renouvellement serait de faire évoluer les choses dans ce sens au cours des 5 prochaines années, en organisant notamment des ateliers interdisciplinaires autour de ce sujet (voir partie 'Actions structurantes').
- En 2018, une nouvelle thématique est apparue à l'interface physique - physique mathématique. Des travaux de plusieurs équipes (en particulier le groupe de M. Filoche à l'Ecole Polytechnique) ont développé une manière originale d'aborder le problème de localisation des ondes, en démontrant l'existence d'un 'paysage' de potentiel caché au sein de tout problème ondulatoire en présence de désordre, dans lequel l'onde se piège classiquement. Cette approche est prometteuse, car elle réduit le problème interférentiel compliqué de localisation à un problème classique. Elle infuse aujourd'hui dans plusieurs communautés, et il nous semble important de l'accompagner.

## 2- Renforcement de l'interdisciplinarité via l'Axe 3

Pour ce renouvellement, un objectif du GDR Complexe sera de poursuivre et de renforcer l'interdisciplinarité et le soutien aux sujets émergents liés au nouvel Axe 3, dont nous mentionnons quelques exemples ci-dessous.

- En optique, plusieurs phénomènes ondulatoires nouveaux ont récemment été décrits dans les milieux désordonnés, basés sur la nature vectorielle de la lumière. Parmi eux, on peut citer les interactions spin-orbite de la lumière -où les variations spatiales de l'indice optique se couplent à la polarisation pour créer des effets Hall de spin semblables à ceux de la matière condensée-, les phénomènes topologiques en optique et l'isolant topologique d'Anderson, ou encore des simulations de graphène utilisant des micro-ondes. Au cœur de ces sujets, la prise en compte des effets de polarisation dans les milieux complexes joue un rôle important. Dans les milieux désordonnés, elle constitue presque un petit changement de paradigme car depuis de nombreuses années la physique de ces systèmes a été essentiellement abordée par des descriptions scalaires.
- Entre 2018 et 2022, plusieurs workshops du GDR Complexe ont amené à faire se côtoyer les physiciens des milieux diffusants avec des opticiens utilisant les milieux non linéaires pour créer des 'fluides de lumières', présentant des propriétés analogues aux superfluides bien connus en physique quantique [Fig. 3]. Pour les 5 prochaines années, nous souhaitons poursuivre et renforcer cette initiative, car elle a mis en évidence un fort intérêt réciproque des chercheurs impliqués, offrant des outils nouveaux pour manipuler les ondes dans les milieux complexes au sens large.

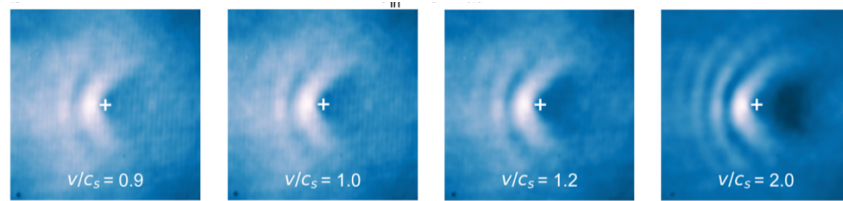


Figure 3 : Observation du caractère superfluide de la lumière dans un crystal non linéaire présentant un défaut d'indice au centre des figures. La non linéarité est augmentée de droite à gauche. À droite, la lumière se diffuse sur le défaut en créant des interférences. À gauche (régime superfluide), la lumière n'est pratiquement plus diffusée [C. Michel et al, Nature Com. 2018].

- Toujours dans un cadre interdisciplinaire, récemment plusieurs chercheurs membres du GDR Complexe ont exploré le concept de 'milieu dépendant du temps', consistant à effectuer un changement temporel plus ou moins rapide des propriétés d'un milieu matériel. Cette idée semble aujourd'hui extrêmement fructueuse, car elle rend accessible de larges pans de la physique que l'on pensait a priori très éloignés de la physique des ondes. Par exemple, on peut réaliser ainsi des systèmes de Floquet ou même des 'cristaux temporels', habituellement plutôt rencontrés en physique quantique. Un changement brutal des propriétés d'un milieu permet également de réaliser ce qu'on appelle un 'quench' et donc d'explorer de la physique statistique hors d'équilibre. Récemment, le concept de milieu temporel a même été exploité pour réaliser l'analogie classique de l'effet Unruh en mécanique quantique avec des ondes à la surface de l'eau !

## POSITIONNEMENT PAR RAPPORT AUX STRUCTURES ET PROJETS DE RECHERCHE EXISTANTS

Les principales communautés scientifiques qui seront couvertes par le GDR Complexe pour ce renouvellement sont résumées sur la Figure 4. Nous y indiquons également le positionnement par rapport aux GDR thématiquement les plus proches : les GDR Ondes, Gaz Quantiques, Elios et Physique Quantique Mésoscopique ('Mésos'). Les zones de recouvrement avec ces GDRs correspondent principalement aux thématiques interdisciplinaires décrites par l'axe 3. À noter que GDR Ondes comporte aussi une sous-composante sur l'imagerie en milieu complexe, mais celle-ci est centrée sur les questions de traitement du signal et d'instrumentation, tandis que le GDR Complexe a une vocation beaucoup plus large et notamment fondamentale sur ce sujet. En pratique, nous sommes en contact régulier avec les responsables de ces groupements (dont la plupart sont aussi membres du GDR Complexe) et des événements pourront sans difficulté être organisés en coordination avec eux. Un exemple représentatif est le Wavinaire 'Questions ouvertes' (voir bilan scientifique ci-dessus), qui a été créé à l'initiative du GDR Ondes mais est organisé conjointement avec le GDR Complexe.

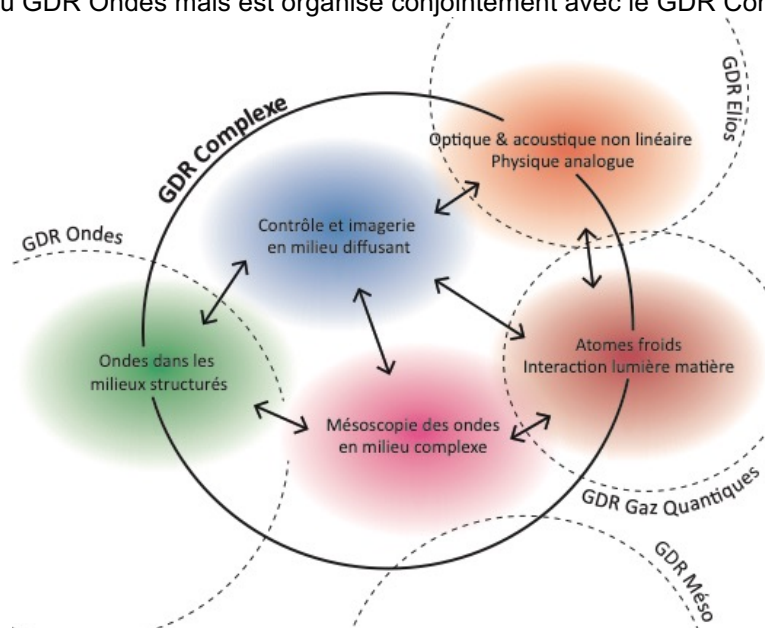


Figure 4 : Positionnement du GDR Complexe au sein des communautés scientifiques, et par rapport aux GDR dont les thématiques sont les plus proches.

Au-delà des GDR, d'autres structures plus petites existent au sein des équipes du GDR Complexe. Parmi elles, on peut citer les collaborations internationales Simons 'Localization of waves' (<https://cse.umn.edu/wave>, groupe de M. Filoche) et 'Harnessing Universal Symmetry Concepts for Extreme Wave Phenomena' (F. Lemoult et M. Fink). La plupart des responsables de ces structures sont néanmoins des membres actifs du GDR Complexe, et sont donc régulièrement en contact avec nous afin d'éviter les doublons ou de rationaliser les aides au financement d'événements scientifiques.

## **ACTIONS STRUCTURANTES ET D'ANIMATION ENVISAGÉES**

*(souligner les nouvelles initiatives)*

Pour les cinq prochaines années, nous prévoyons de garder le même rythme régulier pour les événements généralistes du GDR, à savoir : au moins **deux écoles thématiques** organisées (une école aux Houches et d'ores et déjà prévue et en partie organisée pour septembre 2023) et **une rencontre annuelle tous les ans**. Un point d'organisation que nous souhaitons améliorer est de renforcer la part de contributions orales non invitées dans les rencontres annuelles, afin d'améliorer la diversité des séminaires et de donner plus d'opportunités à de jeunes chercheurs de présenter leurs travaux. Nous envisageons également l'organisation de 'rencontres doctorales' pour permettre aux doctorants d'échanger librement sur leurs travaux de recherche, sur la manière d'appréhender la thèse etc. Concernant les subventions accordées par le GDR, nous privilégierons, le cas échéant, l'aide à la mobilité des étudiants pour des collaborations internationales impliquant des équipes du GDR.

Par rapport aux cinq années écoulées, nous souhaiterions prendre ou pousser l'initiative de l'organisation de plus **d'ateliers thématiques interdisciplinaires** (peut-être un par an), afin notamment de renforcer les sujets du GDR qui peuvent être insuffisamment représentés ou développés lors des rencontres généralistes, et de favoriser l'émergence de collaborations sur des sujets émergents et interdisciplinaires. Le bureau du GDR nouvellement créé (voir partie 'Organisation opérationnelle') vise entre autres à répondre à ce souhait. Nous envisagerons aussi la mise en place d'ateliers d'ouverture autour de sujets comme l'équilibre hommes-femmes, le bilan-carbone des laboratoires ou l'open science (un sujet notamment suggéré par des membres du GDR). Nous souhaiterions enfin pérenniser le dispositif des Wavinaires, qui rencontre un certain succès auprès des doctorants.

Concernant la communication, nous maintiendrons le site web du GDR Complexe (<http://www.lkb.upmc.fr/gdrcomplexe/>), mais celui-ci sera mis à jour afin de mieux mettre en valeur les diverses annonces (en séparant les offres d'emplois et événements scientifiques du GDR par exemple). Une difficulté des cinq années passées a été d'effectuer une maintenance suffisamment régulière du site. Ceci pourra désormais être amélioré grâce à la participation du bureau du GDR qui y aura accès.

Nous poursuivrons enfin le principe de la liste de diffusion du GDR, avec une newsletter envoyée par email avec une fréquence bimensuelle et contenant toutes les informations dont nous prenons connaissance au fil de l'eau.

## **ORGANISATION OPÉRATIONNELLE : BUREAU, COMITÉ DE PILOTAGE**

*(souligner le pourcentage de renouvellement)*

Entre 2018 et 2022, le GDR Complexe était constitué d'un directeur (N. Cherroret, LKB), d'un co-directeur (A. Aubry, Institut Langevin) et d'un Comité Scientifique constitué de douze chercheurs confirmés. En pratique, la plupart des événements du GDR (workshops, conférences, écoles etc.) étaient organisés par le directeur et le co-directeur, et le Comité Scientifique était consulté de temps en temps afin de suggérer des actions ou la mise en avant de thématiques pertinentes.

Pour le renouvellement, nous prévoyons de maintenir cette structure, avec un renouvellement probable de 50% du Comité Scientifique, notamment pour s'approcher de la parité, en y adjoignant un Bureau du GDR paritaire constitué de quatre chercheurs en région. Ces derniers joueront un rôle à la fois de coordinateurs d'événements scientifiques et d'experts thématiques sur des sujets complémentaires à ceux du directeur et du co-directeur, en particulier interdisciplinaires ou à la frontière des activités du GDR. Précisément, le bureau du GDR sera constitué de :

- **Matthieu Davy** (MdC, IETR, UMR 6164, Rennes)  
*Approche statistique des milieux complexes - traitement du signal*
- **Claire Michel** (MdC, INPHYNI, UMR 7010, Nice)  
*Interface milieux désordonnés / optique non linéaire*
- **Tom Bienaimé** (CR CNRS, ISIS, UMR 7006, Strasbourg)  
*Diffusion de la lumière dans les gaz d'atomes / Interface avec la physique des atomes froids*
- **Sophie Brasselet** (DR CNRS, Institut Fresnel, UMR 7249, Marseille)  
*Contrôle de la lumière et Imagerie dans les milieux biologiques*

La motivation pour la création de ce bureau est de permettre une meilleure représentativité des thématiques interdisciplinaires et/ou aux interfaces au sein du GDR, en faisant 'remonter' les informations pertinentes autour de ces sujets à la direction, et en aidant à l'organisation d'ateliers interdisciplinaires. Cela permettra également une plus grande visibilité du GDR au sein de ces communautés.

La structure opérationnelle globale du GDR est résumée par le schéma de la Figure 4.

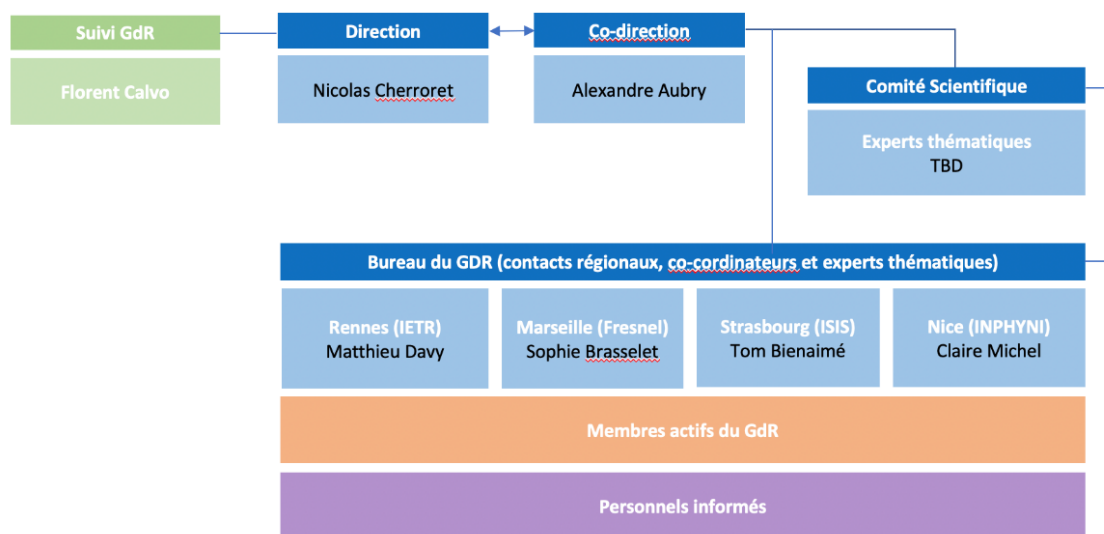


Figure 5 : Structure opérationnelle du GDR Complexe prévue pour le renouvellement.

## POTENTIEL DE VALORISATION, INTERACTIONS POTENTIELLES AVEC LES ENTREPRISES (le cas échéant)

Ces dernières années, de nombreuses start-ups ont été créés à partir de recherches menées par des équipes du GDR Complexe sur des sujets promus par le GDR. Nous citons, à titre d'exemple, *LightON* qui développe une technologie photonique pour les calculs de l'IA à grande échelle, *GreenerWave*, pour le contrôle des ondes électromagnétiques dans les milieux complexes, *Icôneus*, pour l'imagerie fonctionnelle basée sur l'échographie ultra-rapide, ou *Sisprobe* et *Sisvienn*, qui proposent des solutions d'imagerie basées sur les techniques de corrélations de bruit, que ce soit pour la sismologie ou le génie civil. Le GDR Complexe garde des liens forts avec ces start-ups en invitant à chaque fois un ou deux de ces représentants aux réunions annuelles du GDR afin qu'ils présentent leurs activités et discutent des problèmes scientifiques auxquels ils sont confrontés.

## BILAN FINANCIER INDICATIF POUR LA PÉRIODE

L'utilisation du budget du GDR (10000 euros par an) sur la période 2018 - 2022 est détaillée dans le tableau ci-après. Les événements en gras sont ceux organisés directement par le GDR. Pour les autres, le montant subventionné a principalement été dédié au financement de missions de doctorants.

	Evénement	Financement du GDR (budget annuel 10000)
2018	<b>Ecole doctorale 'Transport, Mésoscopie et imagerie en milieu complexe'</b>	10000
2019	<b>Workshop du GDR</b>	8000
	<b>Ecole doctorale 'Imaging in Wave Physics'</b>	2000
	Conférence 'Wave Côte d'Azur'	1000
	Ecole pré-doctorale 'Interaction of light and cold atoms'	1500
2020	Workshop 'Disorder and Chaos'	1000
	<b>Workshop du GDR</b>	0 (converti en ligne)
	L'Ecole prédoctorale 'Quantum Technologies with Light and Matter'	2000
2021	Workshop 'Collective Scattering of Light'	1500
	<b>Workshop du GDR</b>	8000
	Soutien au séminaire inter-laboratoire 'Théorie Quantique de la Matière'	700
2022	<b>Mini-colloque 'Interactions, topology &amp; symmetries in disordered systems'</b>	0 (converti en ligne)
	<b>Workshop du GDR</b>	8500
	Mini-colloque 'Quantum turbulence in atomic systems'	800
	Workshop 'Collective Scattering of Light 2022'	2000
Total	L'école thématique 'Waves in Complex Media, from spatial to temporal degrees of freedom'	3000
		50000

## BUDGET INDICATIF POUR LE RENOUELEMENT

Pour le projet de renouvellement, nous prévoyons une augmentation du besoin de financement du GDR principalement en raison de l'organisation d'ateliers interdisciplinaires, avec un besoin annuel que nous estimons à hauteur de 13000 euros.

## COMPOSITION DU GDR

Liste prévisionnelle des laboratoires - équipes partenaires.

Unité	Equipes participantes	Institut
LP2N (Bordeaux)	Nanophotonique	INP
	Lumière dans les nanostructures complexes	
I2M (Bordeaux)	Physical Acoustics	INSIS
INPHYNI (Nice)	Ondes et Physique Quantique	INP
	Physique Théorique	
	Ondes en milieu complexe	
	Physique non linéaire et hors équilibre	
PhLAM (Lille)	Matériaux & Systèmes photoniques complexes	INP
	Atomes froids	
	Photonique	
	Dynamique des systèmes complexes	

Laboratoire Paul Painlevé (Lille)	Analyse numérique et équations aux dérivées partielles	INP
Institut Fresnel (Marseille)	SEMO MOSAIC CONCEPT CLARTE EPSILON	INSIS
LKB (Paris)	Systèmes Quantiques Complexes Optique Quantique Imagerie en milieu biologique et diffusant Fluctuations quantiques et relativité	INP
Institut Langevin (Paris)		INSIS
MPQ (Paris)	Théorie	INP
IPGP (Paris)	Sismologie Systèmes volcaniques	INSU
Institut Jean Le Rond d'Alembert (Paris)	Modélisation, propagation et imagerie acoustique	INSIS
LPS (Orsay)	Théorie	INP
LPTMS Orsay		INP
LCFIO (Palaiseau)	Gaz quantiques Nanophotonique Optique quantique	INP
Ecole Polytechnique	Physique théorique Acoustique pour les nanosciences Centre Mathématique appliquée	INP
LPMMC (Grenoble)		INP
LiPHY (Grenoble)	OPTIMA	INP
ISTerre (Grenoble)	Ondes et structures	INSU
Institut des Géosciences de l'Environnement	Glace	INSU
ICB (Dijon)	Photonique	INP
IETR (Rennes)	Ondes et signaux	INSIS
Majulab		INP
LPT (Toulouse)		INP
LCAR (Toulouse)	Atomes froids	INP
IRAP (Toulouse)	Dynamique des intérieurs planétaires	INSU
LAUM (Le Mans)		INSIS
LMA (Marseille)	Ondes et imagerie	INSIS
Institut Lumière Matière	Modélisation de la matière condensée et des interfaces Optique non linéaire et interfaces	INP
ISIS Strasbourg	Matière Quantique Exotique Physique Quantique Nanostructures	INP
LabTAU (Lyon)	Wave and Instrumentation	

ENS Lyon	Physique Théorique	INP
Physics for Medecine (Paris)		
Institut de la Vision (Paris)	3D Microscopy Real time imaging in patients and celles Wavefront engineering microscopy	
SPPIN	Singular Imaging	
LPT Marseille	Nanophysique	INP
ONERA		
Femto-ST	Photonique & microscopies MOSAIC OPTO	INSIS
INSP	Nanostructures et optique Acoustique pour les nanosciences	INP
Laboratoire d'imagerie bio-médicale	Physiologie et pathologie de la microcirculation Ultrasons et imagerie pour la caractérisation de la qualité osseuse Développement d'imagerie et de thérapie ciblée	