



Proposition de thèse 2025-2028: Optomécanique quantique dans un cristal dopé aux ions de terre rare

Direction : Anne Louchet-Chauvet

Lieu de la thèse : Institut Langevin, 1 rue Jussieu, 75005 Paris, France

Contexte général

L'optomécanique est un domaine de la physique fondamentale en plein essor, qui vise à coupler un système quantique avec un système mécanique afin de parvenir à créer des états non-classiques macroscopiques. Dans cette perspective, les systèmes dits *hybrides*, où le couplage est assuré par le biais des contraintes mécaniques, sont particulièrement prometteurs [Treutlein2014]. Si les quelques approches poursuivies dans le domaine micro-onde ont fait des progrès remarquables, il n'en est pas de même dans le domaine optique où les émetteurs ont généralement des durées de vie très courtes (ex : boîtes quantiques).

Dans ce contexte, les ions de terre rare en matrice cristalline (*Rare-Earth Ion-doped Crystals*, REIC) font figure d'exception : ils combinent un caractère intrinsèquement hybride (en raison du couplage des niveaux électroniques à la déformation de la maille cristalline) et des propriétés de cohérence à basse température exceptionnelles pour des systèmes à l'état solide (avec des largeurs de raie pouvant atteindre quelques kHz). La combinaison de ces deux propriétés en fait des candidats idéaux pour explorer le couplage optomécanique dans des régimes jusqu'alors inaccessibles, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles perspectives dans le domaine.

Programme de travail

L'accès aux raies très fines des ions de terre rare en matrice cristalline nécessitera le recours au creusement spectral (*Spectral Hole Burning*, SHB), qui consiste à créer une étroite fenêtre de transparence dans un profil d'absorption inhomogène. D'abord conçue pour la spectroscopie haute-résolution, cette méthode est aujourd'hui couramment utilisée dans de nombreuses architectures liées aux technologies quantiques (ex : mémoires quantiques [Afzelius2009], ou analyseur spectral large bande [Berger2016, Louchet2020]). Elle permet de sélectionner une fraction des ions et de restaurer leurs propriétés quantiques, qui autrement seraient masqués par l'élargissement inhomogène associé aux défauts du cristal.

La thèse portera sur l'exploitation du couplage optomécanique dans les REICs fonctionnalisés par SHB. Le travail s'articulera autour de trois axes complémentaires.

- Le premier axe sera centré sur l'étude et l'optimisation d'un **capteur quantique** accélérométrique compatible avec des températures cryogéniques. En effet, aujourd'hui, les meilleurs accéléromètres cryogéniques (MEMS) présentent des sensibilités de l'ordre du $\sim 10 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}$ avec une bande passante de $\sim 1 \text{ kHz}$. Les REIC pourraient permettre d'aller bien au-delà en termes de bande passante avec des sensibilités comparables, grâce à l'interrogation quasi-continue d'un trou spectral. La mise en œuvre d'un tel capteur pourra bénéficier à l'ensemble de la recherche en technologies quantiques, notamment pour le diagnostic vibratoire de cryostats.
- Le deuxième axe de recherche, centré sur les cristaux dopés, vise à approfondir la **compréhension des mécanismes de décohérence** qui sont encore mal élucidés, en particulier ceux associés au couplage optomécanique. On s'intéressera par exemple à la géométrie des échantillons, à la manière dont ceux-ci sont fixés, ou encore à l'excitation d'une large fraction des ions, et à leur impact sur les propriétés spectroscopiques des ions.

- Le troisième axe, résolument fondamental et exploratoire, vise à exploiter la finesse des raies des REICs pour explorer de **nouveaux régimes du couplage optomécanique**. En effet, grâce aux taux de décohérence optique de l'ordre du kHz, le couplage à la déformation pourra opérer en régime de couplage fort ($g_0 > \Gamma_{opt}$) à condition de disposer des niveaux de fluctuations quantiques au point zéro suffisamment élevés. Pour atteindre ces régimes, nous aurons besoin de résonateurs mécaniques de faible masse, préparés dans des monocristaux dopés. Des lamelles cristallines de $300\mu m$ d'épaisseur sont d'ores et déjà disponibles et permettront de faire des premières caractérisations.

Le poids relatif de chacun de ces axes sera ajusté en fonction de l'avancement et des centres d'intérêt du/de la doctorant·e.

La thèse sera dirigée par Anne Louchet-Chauvet (Institut Langevin), et co-encadrée par Pierre Verlot (LuMIn). Elle s'inscrit dans un [projet de recherche collaborative](#) soutenu par l'ANR et qui implique 5 laboratoires de recherche partenaires : l'Institut Langevin, LuMIn, l'IRCP, le LTE et l'Institut Néel. Ce projet finance au total quatre bourses de thèse réparties entre ces laboratoires. Les doctorant·es concerné·es bénéficieront du dynamisme de cette collaboration grâce à des points d'étape réguliers à l'échelle du consortium, et pourront également effectuer des séjours dans les laboratoires partenaires.

Description du laboratoire

L'Institut Langevin est une Unité Mixte de Recherche de l'ESPCI Paris et du CNRS dédiée à la physique des ondes et à ses applications. Il allie dans un esprit très pluridisciplinaire, recherche fondamentale, recherche appliquée et création d'entreprises. Le spectre des ondes concernées est très large : ondes mécaniques (ondes acoustiques, élastiques et sismiques, vagues), ondes électromagnétiques (radiofréquences, micro-ondes, TéraHertz) et optique (infrarouge et visible). Les chercheurs de l'Institut se donnent pour objectif de comprendre les mécanismes de propagation de ces différents types d'ondes dans les milieux les plus complexes et de tirer parti de cette meilleure compréhension pour concevoir des instruments originaux pour la manipulation de ces ondes et l'imagerie de ces milieux.

Profil recherché

Le·la candidat·e devra avoir des connaissances de base dans un ou plusieurs des domaines suivants : mécanique quantique, interaction lumière-matière, physique des lasers et/ou physique de la matière condensée. Un goût pour la physique expérimentale et le travail en équipe est attendu, ainsi qu'un bon niveau d'anglais. Des compétences de base en programmation seront appréciées.

Références bibliographiques

- Louchet-Chauvet, A., Ahlefeldt, R., & Chanelière, T. (2019). [Piezospectroscopic measurement of high-frequency vibrations in a pulse-tube cryostat](#). *Review of Scientific Instruments*, 90(3).
- Louchet-Chauvet, A., & Chanelière, T. (2023). [Strain-mediated ion-ion interaction in rare-earth-doped solids](#). *Journal of Physics: Condensed Matter*, 35(30), 305501.
- Louchet-Chauvet, A., Verlot, P., Poizat, J. P., & Chanelière, T. (2023). [Piezo-orbital backaction force in a rare-earth-doped crystal](#). *Physical Review Applied*, 20(5), 054004.

PhD Proposal 2025-2028:

Quantum Optomechanics in a Rare-Earth Ion-Doped Crystal

Supervisor: Anne Louchet-Chauvet

Thesis location: Institut Langevin, 1 rue Jussieu, 75005 Paris, France

General Context

Optomechanics is a rapidly growing field of fundamental physics that aims to couple a quantum system with a mechanical system to create macroscopic non-classical states. In this context, so-called hybrid systems, where coupling is ensured through mechanical constraints, are particularly promising [Treutlein2014]. While some approaches in the microwave domain have achieved remarkable progress, the same is not true in the optical domain, where emitters generally have very short lifetimes (e.g., quantum dots).

In this setting, rare-earth ion-doped crystals (REICs) stand out as an exception. They combine an intrinsically hybrid nature (due to the coupling of electronic levels to the deformation of the crystal lattice) with exceptional low-temperature coherence properties for solid-state systems (with linewidths reaching a few kHz). The combination of these two properties makes them ideal candidates for exploring optomechanical coupling in previously inaccessible regimes, thus opening up new perspectives in the field.

Work Plan

Accessing the extremely narrow lines of rare-earth ions in a crystalline matrix will require spectral hole burning (SHB), a technique that creates a narrow transparency window within an inhomogeneous absorption profile. Initially designed for high-resolution spectroscopy, this method is now widely used in various quantum technology architectures (e.g., quantum memories [Afzelius2009] or broadband spectral analyzers [Berger2016, Louchet2020]). It allows for the selection of a fraction of ions and restores their quantum properties, which would otherwise be masked by the inhomogeneous broadening associated with crystal defects.

This PhD research will focus on leveraging optomechanical coupling in REICs functionalized by SHB. The work will be structured around three complementary axes:

- **Quantum Accelerometer Sensor Optimization** : This axis will focus on the study and optimization of a quantum accelerometer sensor compatible with cryogenic temperatures. Currently, the best cryogenic accelerometers (MEMS) offer sensitivities in the range of $\sim 10 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}$ with a bandwidth of $\sim 1\text{kHz}$. REICs could enable significant improvements in bandwidth while maintaining comparable sensitivities, thanks to the quasi-continuous interrogation of a spectral hole. The implementation of such a sensor could benefit quantum technology research, particularly for vibrational diagnostics of cryostats.
- **Decoherence Mechanisms in Doped Crystals** : This research axis aims to deepen the understanding of decoherence mechanisms, particularly those associated with optomechanical coupling, which remain poorly understood. Factors such as sample geometry, mounting techniques, and excitation of a large fraction of ions will be examined for their impact on the spectroscopic properties of the ions.

- **Exploration of Novel Optomechanical Coupling Regimes** : This fundamental and exploratory axis will exploit the narrow linewidths of REICs to investigate new optomechanical coupling regimes. Given the optical decoherence rates on the order of kHz, coupling to lattice deformation could operate in the strong coupling regime ($g_0 > \Gamma_{opt}$) if sufficiently high quantum zero-point fluctuation levels are achieved. To access these regimes, we will require low-mass mechanical resonators prepared in doped single crystals. Thin crystalline slabs with a thickness of $300\mu m$ are already available and will be used for initial characterizations.

The weight of each research axis will be adjusted based on the progress and interests of the PhD candidate.

Supervision and Collaborative Framework

The PhD will be supervised by Anne Louchet-Chauvet (Institut Langevin) and co-supervised by Pierre Verlot (LuMIn). It is part of a [collaborative research project](#) funded by the ANR, involving five partner research laboratories: Institut Langevin, LuMIn, IRCP, LTE, and Institut Néel. This project funds a total of four PhD positions across these laboratories. The selected PhD candidates will benefit from the dynamic collaboration through regular consortium meetings and will have opportunities for research stays at partner laboratories.

Laboratory Description

Institut Langevin is a Joint Research Unit of ESPCI Paris-PSL and CNRS, dedicated to wave physics and its applications. It combines fundamental research, applied research, and entrepreneurship in a highly interdisciplinary environment. The spectrum of studied waves is broad, covering mechanical waves (acoustic, elastic, seismic, and water waves), electromagnetic waves (radio frequencies, microwaves, terahertz), and optics (infrared and visible light). Researchers at the institute aim to understand the propagation mechanisms of these waves in complex media and leverage this knowledge to design innovative instruments for wave manipulation and imaging.

Candidate Profile

The candidate should have a background in one or more of the following fields: quantum mechanics, light-matter interaction, laser physics, and/or condensed matter physics. A strong interest in experimental physics and teamwork is expected, along with proficiency in English. Basic programming skills will be appreciated.

References

- Louchet-Chauvet, A., Ahlefeldt, R., & Chanelière, T. (2019). Piezospectroscopic measurement of high-frequency vibrations in a pulse-tube cryostat. *Review of Scientific Instruments*, *90*(3).
- Louchet-Chauvet, A., & Chanelière, T. (2023). Strain-mediated ion-ion interaction in rare-earth-doped solids. *Journal of Physics: Condensed Matter*, *35*(30), 305501.
- Louchet-Chauvet, A., Verlot, P., Poizat, J. P., & Chanelière, T. (2023). Piezo-orbital backaction force in a rare-earth-doped crystal. *Physical Review Applied*, *20*(5), 054004.