

Sujet thèse / PhD subject 2025

Titre Thèse	Contrôle de l'interférence quantique dans des modes nanoélectromécaniques couplés multiples	
PhD Title	Quantum interference control in multiple coupled nanoelectromechanical modes	
(Co)-Directeur	Xin Zhou	E-mail : xin.zhou@cnr.fr
(Co)-Directeur		E-mail :
(Co)-Encadrant (s)		E-mail :
Laboratoire		Web : www.iemn.fr
Groupe(s)	Physique	Web : not updated
Projet phare principal	Composants	
Thèse fléchée Flagships IEMN ?	Oui ./ Non : Oui Flagship concerné : Composants et NanoCaractérisation	
Demande de labellisation Université de Lille (GREAL, labellisée)	Oui / Non : Oui Label :	
Financement acquis Oui ☐ Non ☐ Partiel ☐	Si acquis (total ou partiel), préciser : (contrat, organisme, Université étrangère, ,) :	
Financement demandé	Contrat Doctoral Etablissement	ULille ☒ Centrale Lille ☐ JUNIA ☐
	Région ou Autre ☒ Préciser :	Co financement (Préciser l'origine, demande en cours, et si acquis ou pas) : ANR DASH

Résumé (français) / Abstract (anglais)

L'optomécanique des micro-ondes étudie l'interaction entre les photons des micro-ondes et les vibrations mécaniques (phonons) dans les systèmes à micro- et nano-échelle. Cette interaction est typiquement médiée par la pression de radiation ou les forces électromagnétiques à l'intérieur des cavités à micro-ondes. Les systèmes optomécaniques à micro-ondes jouent un rôle crucial dans l'ingénierie quantique, en particulier dans le traitement de l'information quantique, la détection quantique et les systèmes quantiques hybrides. Ils permettent de contrôler, de mesurer et de manipuler avec précision des déplacements mécaniques allant de grandes populations de phonons dans le régime classique à des états fondamentaux quantiques avec une précision inférieure au phonon.

L'objectif de ce travail est d'utiliser un système optomécanique à micro-ondes pour détecter les vibrations nanoélectromécaniques au niveau des phonons et d'étudier l'interférence des phonons dans de multiples modes couplés, à la fois dans le régime classique et à la limite quantique. Pour ce faire, nous concevrons et fabriquerons des circuits quantiques supraconducteurs constitués d'une cavité micro-ondes couplée capacitivement à de multiples résonateurs à double tambour. Ces dispositifs optomécaniques à micro-ondes seront refroidis à des températures cryogéniques, ce qui permettra de détecter un mouvement brownien thermique de l'ordre de 10^{-14} m. Ce mouvement sera mesuré et lu par l'intermédiaire de phonons micro-ondes confinés à l'intérieur de la cavité. En utilisant des techniques de pompage à bande latérale optomécanique, ces travaux permettront (1) de détecter un transfert d'état cohérent entre plusieurs modes de phonon, (2) d'explorer les limites du routage des phonons dans un système couplé multimode et (3) d'établir une règle générale pour l'interférence destructive et constructive des phonons. Ces travaux contribueront à l'avancement de la détection quantique, du traitement des signaux optomécaniques et du contrôle cohérent des phonons pour le traitement de l'information quantique. Le candidat retenu s'engagera dans une recherche pionnière dans le domaine de l'optomécanique micro-ondes à l'IEMN, en tirant parti d'une infrastructure de classe mondiale qui comprend l'accès à des installations de nanofabrication de pointe. Le poste offre également des capacités de mesure cryogénique des micro-ondes de pointe, permettant une caractérisation à basse température et à très faible bruit grâce à des installations de spectroscopie micro-ondes avancées, des méthodologies de refroidissement à bande latérale et des techniques de détection des phonons à haute sensibilité. Cet ensemble complet de ressources offre un environnement exceptionnel pour explorer de nouveaux phénomènes et repousser les limites de la recherche quantique et optomécanique.

Abstract (anglais)

Microwave optomechanics studies the interaction between microwave photons and mechanical vibrations (phonons) in micro- and nanoscale systems. This interaction is typically mediated by radiation pressure or electromagnetic forces within microwave cavities. Microwave optomechanical systems play a crucial role in quantum engineering, particularly in quantum information processing, quantum sensing and hybrid quantum systems. They enable precise control, measurement and manipulation of mechanical displacements ranging from large phonon populations in the classical regime to quantum ground states with sub-phonon precision.

The aim of this work is to use a microwave optomechanical system to detect nanoelectromechanical vibrations at the phonon level and to study phonon interference in multiple coupled modes, both in the classical regime and at the quantum limit. To achieve this, we will design and fabricate superconducting quantum circuits consisting of a microwave cavity capacitively coupled to multiple double-drum resonators. These microwave optomechanical devices will be cooled to cryogenic temperatures, allowing the detection of thermal Brownian motion on the order of 10^{-14} m. This will be measured and read out via microwave phonons confined within the cavity. Using optomechanical sideband pumping techniques, this work will (1) Detect coherent state transfer between multiple phonon modes, (2) Explore the limits of phonon routing in a multi-mode coupled system and (3) Establish a general rule for destructive and constructive phonon interference. This work will contribute to the advancement of quantum sensing, optomechanical signal processing and coherent phonon control for quantum information processing. The successful candidate will engage in pioneering research within the field of microwave optomechanics at IEMN, leveraging world-class infrastructure that includes access to state-of-the-art nanofabrication facilities. The position also offers cutting-edge cryogenic microwave measurement capabilities, enabling low-temperature, ultra-low-noise characterization through advanced microwave spectroscopy setups, sideband cooling methodologies, and high-sensitivity phonon detection techniques. This comprehensive suite of resources provides an exceptional environment to explore novel phenomena and push the boundaries of quantum and optomechanical research.

Liste de 10 publications maximum portant directement sur le sujet en soulignant celles du laboratoire.

- [1] 'Imaging nanomechanical vibrations and manipulating parametric mode coupling, by using scanning microwave microscopy', H. Xu, S. Venkatachalam, T. Rabenimanana, C. Boyaval, S. Eliet, F. Braud, E. Collin, D. Theron, X. Zhou, **Nano Letters**, 24 (28), 8550–8557 (2024) <https://hal.science/hal-04651920>
- [2] 'Self-sustained optomechanical state destruction triggered by the Kerr nonlinearity', A. Delattre, I. Golokolenov, R. Pedurand, X. Zhou, A. Fefferman, E. Collin, **Physical Review Research** 6 (4), 043038 (2024) <https://hal.science/hal-04523212>
- [3] 'Fabrication of Silicon Nitride Membrane Nanoelectromechanical Resonator', Xu, Hao, Srisaran Venkatachalam, Christophe Boyaval, Pascal Tilmant, Francois Vaurette, Yves Deblock, Didier Theron, and Xin Zhou, **Microelectronic Engineering** 280 (August 2023): 112064. <https://hal.science/hal-04172152/>
- [4] 'Effects of Stochastic Forces on the Nonlinear Behaviour of a Silicon Nitride Membrane Nanoelectromechanical Resonator', Venkatachalam, Srisaran, and Xin Zhou. **Nanotechnology** 34, no. 21 (March 2023): 215202. <https://hal.science/hal-04007442v1>
- [5] 'Thermodynamics of a Single Mesoscopic Phononic Mode', Golokolenov, Ilya, Arpit Ranadive, Luca Planat, Martina Esposito, Nicolas Roch, Xin Zhou, Andrew Fefferman, and Eddy Collin, **Physical Review Research** 5, no. 1 (January 2023). <https://doi.org/10.1103/physrevresearch.5.013046>.
- [6] 'Coupling Capacitively Distinct Mechanical Resonators for Room-Temperature Phonon-Cavity Electromechanics', A. Pokharel, H. Xu, S. Venkatachalam, E. Collin, X. Zhou, **Nano Letters**, (2022) 22, 7351. <https://hal.science/hal-03651266v1>
- [7] 'Microwave Optomechanically Induced Transparency and Absorption Between 250 and 450 mK', Kumar, Sumit, Dylan Cattiaux, Eddy Collin, Andrew Fefferman, and Xin Zhou **Journal of Low Temperature Physics**, 210, 562 (2023). <https://hal.science/hal-03554556v1>

- [8] 'High-Q Silicon Nitride Drum Resonators Strongly Coupled to Gates', Zhou, Xin, Srisaran Venkatachalam, Ronghua Zhou, Hao Xu, Alok Pokharel, Andrew Fefferman, Mohammed Zaknounge, and Eddy Collin, **Nano Letters** 21, no. 13 (June 2021): 5738–44. <https://hal.science/hal-03263144v1>
- [9] 'A macroscopic object passively cooled into its quantum ground state of motion beyond single-mode cooling' D. Cattiaux, I. Golokolenov, S. Kumar, M. Sillanpää, LM. de Lépinay, X. Zhou, A. D. Armour, O. Bourgeois, A. Fefferman, E. Collin, **Nature Communications** 12, 6182 (2021) <https://hal.science/hal-03412629v1>
- [10] 'Electric circuit model of microwave optomechanics', X. Zhou, D. Cattiaux, D. Theron, E. Collin, **Journal of Applied Physics** (2021) 129, 114502, <https://hal.science/hal-03066796v1>