

**PhD Thesis Project**  
**Fluides quantiques de lumière pour la photonique intégrée:**  
**dispositifs à polaritons guidés**

**Quantum fluids of light for integrated photonics:**  
**Waveguide polariton devices**

**Présentation détaillée du projet doctoral :**

The interaction between electronic excitations (excitons) and photons is strongly enhanced in optical microcavities, compared to a bulk medium. When the interaction is large enough, it can reach the strong coupling regime, where the perturbation theory isn't suitable anymore to understand the light-matter interaction. In this regime, the new eigenstates are the so-called polaritons, half exciton/half photon quasi-particles. They can be generated, transported, accumulated in dense quantum phases and brought into strong interactions. The discovery of the Bose condensation of polaritons in 2006 [1] (at low temperature in a GaAs microcavity) has triggered many interesting research projects and led to the discovery of the superfluidity of polariton condensates, the observation of unique kinds of vortices in these "quantum fluids of light", and the development of polaritonic devices.

GaN and ZnO-based microcavities have raised a large interest in the community thanks to their robust excitons and large oscillator strength. Indeed polariton condensates can be demonstrated at room temperature, which is a striking advantage with respect to GaAs devices operated at cryogenic temperatures. Together with our colleagues from the laboratories CRHEA, C2N and IP, our group has demonstrated in 2013 the condensation of polaritons in a ZnO microcavity at 300K [2] and investigated the spatial propagation of the condensates in a standard 2D cavity [3].

The present PhD proposal is focused on a new kind of polaritonic device: the polaritonic waveguide, i.e. an optical waveguide in which propagating photons and excitons are in the strong coupling regime. The waveguide polaritons have much longer lifetimes than cavity polaritons due to the low waveguide losses, and their investigation in GaAs is quite recent [4]. Dedicated samples from CRHEA and C2N based on ZnO and GaN show that polariton lasing can be achieved in this new geometry, with the formation of new polariton condensates. We plan to control the non-linear formation of polariton condensates and associated solitonic phases in polaritonic waveguides, inspired from the atomic physics community, at the frontier between non-linear optics, quantum optics and condensate physics.

L'interaction entre les excitations électroniques (excitons) et les photons est fortement améliorée dans les microcavités optiques, par rapport à un matériau massif. Quand elle est assez importante, le régime de couplage fort peut être atteint, régime où la théorie des perturbations ne convient plus pour comprendre l'interaction lumière-matière. Il en résulte de nouveaux états propres appelés polaritons, qui sont des quasi-particules mi-exciton/mi-photon. Ils peuvent être générés, transportés, accumulés en phases quantiques denses et mis en interactions fortes. La découverte de la condensation Bose des polaritons en 2006 [1] (à basse température dans une microcavité GaAs) a suscité de nombreux projets de recherche intéressants et conduit à la découverte de la superfluidité des condensats de polaritons, l'observation de vortex dans ces « fluides quantiques de lumière » et le développement de dispositifs polaritoniques.

Les microcavités basées sur GaN et ZnO ont suscité un grand intérêt dans la communauté grâce à la robustesse de leurs excitons et à leur grande force d'oscillateur. En effet avec ces matériaux, les condensats de polaritons peuvent être mis en évidence à température ambiante, ce qui constitue un avantage indéniable par rapport aux dispositifs GaAs fonctionnant à des températures cryogéniques. Avec nos collègues des laboratoires CRHEA, C2N et IP, notre groupe a démontré en 2013 la condensation de polaritons dans une microcavité ZnO à 300K [2] et a étudié la propagation spatiale des condensats dans une cavité 2D standard [3].

La présente thèse porte sur un nouveau type de dispositif polaritonique : le guide d'onde polaritonique, c'est-à-dire un guide d'ondes optique dans lequel les photons et les excitons se propageant se trouvent dans le régime de couplage fort. Les polaritons de guides d'ondes ont des durées de vie beaucoup plus longues que les polaritons de cavités en raison des faibles pertes des guides d'ondes, et leur étude dans GaAs est relativement récente [4]. Des échantillons dédiés du CRHEA et du C2N basés sur ZnO et GaN montrent que le laser à polaritons peut être obtenu dans cette nouvelle géométrie, avec la formation d'un nouveau type de condensats de polaritons. Nous envisageons d'étudier la formation non linéaire de condensats de polaritons, associés à des phases de solitons, dans les guides d'ondes polaritoniques, une physique inspirée de la communauté de la physique atomique, à la frontière entre l'optique non-linéaire, l'optique quantique et la physique des condensats.

## Contexte

The control of the coupling between photons and excitons is an expanding research domain standing at the frontier between many fields of condensed matter physics: nano-technologies, quantum simulators, theory of electromagnetism and quantum optics, nonlinear optics.

Our research is focused on the fundamental features and the applied prospects related to polariton microcavities, from spin-dependent polariton interactions to polariton lasers, polariton condensates and polariton devices.

Le contrôle du couplage entre photons et excitons est un domaine de recherche en plein essor qui se situe à la frontière de nombreux domaines de la physique de la matière condensée : les nanotechnologies, les simulateurs quantiques, la théorie de l'électromagnétisme et l'optique quantique et l'optique non linéaire.

Nos recherches se concentrent sur les aspects fondamentaux et les perspectives appliquées des polaritons de microcavités, des interactions dépendants du spin jusqu'aux lasers à polaritons, en passant par les condensats de polaritons et les dispositifs à polaritons.

## **Objectif**

The thesis subject, developed in close collaboration with members of the OECS team will allow the PhD student to master the concepts and experimental knowhow of quantum optics, photonics, semiconductor nanostructures for optoelectronics and nonlinear optics.

The experience gained during this thesis, both experimentally and theoretically, will be an undeniable asset for its future orientation in both the industrial and academic fields.

Le sujet de la thèse permettra au doctorant de maîtriser les concepts fondamentaux et les techniques expérimentales au cœur de l'optique quantique, la photonique, de l'étude des nanostructures semiconductrices pour l'opto-électronique, et de l'optique non-linéaire.

L'expérience acquise au cours de cette thèse, tant expérimentale que théorique, sera un atout indéniable pour son insertion professionnelle future dans les domaines industriels et/ou académiques.

## **Méthode : pas nécessaire de le remplir**

### **Objectifs de valorisation des travaux de recherche**

Publications, Conférences

**Keywords :** Optics, quantum physics, nonlinear optics, nanophotonics, microlaser

Optique, physique quantique, optique non-linéaire, nanophotonique, microlaser

### **Profil et compétences recherchées :**

Le candidat devra avoir une formation solide de niveau master en physique des semiconducteurs et/ou en optique quantique. Une expérience en spectroscopie optique ou en optique non-linéaire sera appréciée.

The candidate should have a strong background (master degree) in semiconductor physics and/or quantum optics, optical spectroscopy, non-linear optics.

### **Précision sur l'encadrement :**

The thesis will take place in the team OECS (Optics of collective states and spins), axis PEPS, of the Laboratory Charles Coulomb (L2C). We have developed a broad expertise in the field of light-matter coupling in wide bandgap semiconductors, from polariton physics in GaN and ZnO microcavities to photonic crystals, microdisks, and microlasers from the blue to the UV spectral range. Three experimental platforms are dedicated to wide bandgap nanostructures, including a micro-spectroscopy setup specifically designed for the nonlinear spectroscopy and imaging of nitride optical resonators.

La thèse se déroulera au sein de l'équipe OECS (Optics of collective states and spins, axe thématique PEPS) du laboratoire Charles Coulomb (L2C). Nous avons développé une vaste expertise dans le domaine du couplage lumière-matière dans les semi-conducteurs à grands gaps, de la physique des polaritons dans les microcavités GaN et ZnO aux cristaux photoniques, aux microdisques et microlasers UV et bleus. Trois plates-formes expérimentales sont dédiées aux nanostructures grands gaps, y compris une configuration de micro-spectroscopie spécialement conçue pour la spectroscopie non-linéaire et l'imagerie des résonateurs optiques nitrures.

### **Conditions scientifiques matérielles (conditions de sécurité spécifiques) et financières du projet de recherches :**

### **Objectifs de valorisation des travaux de recherche du doctorant : diffusion, publication et confidentialité, droit à la propriété intellectuelle,... :**

The results are of interest for both the ICT (information and communication technologies) community and the quantum optics and quantum technology community. Publications in high-impact scientific journals and conferences can be expected.

Les résultats sont intéressants à la fois pour la communauté des TIC (technologies de l'information et de la communication) et pour la communauté de

l'optique quantique et des technologies quantiques. Des publications dans des revues scientifiques et des conférences à fort impact peuvent être attendues.

### **Collaborations envisagées :**

Labex fundings secured (Ganex, 2020-2024)

C2N Saclay (Sophie Bouchoule), CRHEA Nice (J. Zuniga-Perez), IP Clermont-Ferrand (J. Leymarie, G. Malpuech).

### **Ouverture Internationale :**

Possible collaboration avec l'Université de Strathclyde, Glasgow, Scotland

### **Références bibliographiques :**

1. Kasprzak, J. *et al.* *Bose-Einstein condensation of exciton polaritons*. *Nature* **443**, 409–414 (2006).
2. Li, F. *et al.* *From Excitonic to Photonic Polariton Condensate in a ZnO-Based Microcavity*. *Phys Rev Lett* **110**, 196406– (2013).
3. Hahe, R. *et al.* *Interplay between tightly focused excitation and ballistic propagation of polariton condensates in a ZnO microcavity*. *Phys. Rev. B* **92**, 235308 (2015).
4. Walker, P. M. *et al.* *Ultra-low-power hybrid light-matter solitons*. *Nat. Commun.* **6**, 8317 (2015).
5. Brimont *et al.*, *Strong coupling of exciton-polaritons in a bulk GaN planar waveguide: quantifying the Rabi splitting*, arXiv:2002.05066, and submitted (2020)

### **Supervision :**

Thierry Guillet : [Thierry.Guillet@umontpellier.fr](mailto:Thierry.Guillet@umontpellier.fr)

Christelle Brimont : [Christelle.Brimont@umontpellier.fr](mailto:Christelle.Brimont@umontpellier.fr)