

## **Proposition de sujet de thèse – 2022**

**Intitulé français du sujet de thèse proposé :** *Turbulence d'ondes en fibres optiques multimodes désordonnées*

**Intitulé en anglais :** *Wave turbulence in disordered multimode optical fibers*

**Unité de recherche :** Laboratoire ICB – UMR 6303

**Nom, prénom et courriel du directeur (et co-directeur) de thèse :**

*Directeur:* Picozzi Antonio, Antonio.Picozzi@u-bourgogne.fr

*Co-directeur:* Garnier Josselin, Josselin.Garnier@polytechnique.edu

*Co-directeur:* Millot Guy, Guy.Millot@u-bourgogne.fr

**Domaine scientifique principal de la thèse :** *Turbulence d'ondes*

**Domaine scientifique secondaire de la thèse :** *Optique non linéaire*

**Financement envisagé :** *Bourse Ministère*

**Contexte du projet de Recherche :**

La turbulence d'ondes, qui intervient dans de nombreux phénomènes naturels (surface d'une mer agitée par exemple), est un sujet à la pointe de la recherche actuelle. Elle repose sur une description statistique des interactions d'un ensemble d'ondes faiblement non-linéaires. Le projet de thèse porte sur la turbulence d'ondes optiques en présence d'un désordre structurel du milieu de propagation, omniprésent dans la nature. En régime faiblement non linéaire et en absence de désordre, des méthodes systématiques ont été développées dans le cadre de la théorie de turbulence d'ondes, laquelle a été appliquée avec succès à de nombreux domaines de la physique. L'optique non linéaire permet l'étude de la turbulence d'ondes dans le cadre d'expériences relativement simples, où des comportements phénoménologiques variés ont pu être identifiés sur la base de différents formalismes de turbulence d'ondes (condensation d'ondes en analogie avec la condensation de Bose-Einstein, ou la formation de structures incohérentes à grande échelle en analogie avec la gravitation et la formation de galaxies dans l'univers) [1].

**Description du projet scientifique :**

Dans ce projet combinant à la fois théorie, simulations numériques et validation expérimentale nous envisageons d'étendre différents aspects de la turbulence d'ondes optiques en prenant en compte un désordre structurel du milieu non linéaire de propagation. En effet, la propagation de la lumière dans une fibre optique multimode conventionnelle est affectée par le désordre dû à des imperfections structurelles ou à des perturbations extérieures [2]. Les développements théoriques seront analysés par les simulations numériques, lesquelles permettront de concevoir les expériences qui seront

réalisées au sein de l'équipe SAFIR de l'ICB. L'impact du désordre sur la condensation d'ondes sera étudié en relation avec l'effet de nettoyage spatial de faisceau optique [3], dont les mécanismes sous-jacents restent encore mal compris [4-5]. Nous considérerons l'extension au domaine spatio-temporel du phénomène de condensation d'ondes identifié dans le domaine purement spatial et la possibilité d'observer des états d'équilibre thermodynamiques caractérisés par des températures négatives [collaboration Un. Trento, BEC Center, Italie]. Nous étudierons également le rôle d'un désordre géométrique du système dans le cadre de fibres optiques chaotiques (section transversale tronquée), en relation avec les billards chaotiques [collaboration Un. Cote d'Azur, Nice]. En analogie avec les interactions gravitationnelles [6], nous étudierons aussi le processus de thermalisation d'ondes optiques en présence d'interactions à longue portée en configuration de propagation guidée [collaboration Un. Glasgow, UK].

Les travaux de thèse seront menés dans le cadre de la Graduate School EIPHI. Ils s'adosseront aux équipements de pointe de l'équipex+ SMARTLIGHT. Durant sa thèse, le doctorant participera à plusieurs conférences nationales et internationales ainsi qu'à des écoles thématiques internationales. Il aura l'opportunité d'effectuer des séjours de recherche dans des équipes extérieures de grande renommée. En plus des collaborations déjà mentionnées Il bénéficiera d'interactions avec des collègues des départements Photonique et ICQ, ainsi que du soutien des services communs de mécanique, informatique et électronique de l'ICB. Des missions d'enseignement pourront également lui être confiées en Licence.

#### Références:

- [1] A. Picozzi, J. Garnier, T. Hansson, P. Suret, S. Randoux, G. Millot, D. Christodoulides, *Optical wave turbulence: Toward a unified nonequilibrium thermodynamic formulation of statistical nonlinear optics*, Physics Reports 542, 1-132 (2014)
- [2] I.P. Kaminow, T. Li, and A.F. Willner, *Optical Fiber Telecommunications, Systems and Networks* (Sixth Ed., Elsevier, 2013)
- [3] K. Krupa, A. Tonello, B.M. Shalaby, M. Fabert, A. Barthélémy, G. Millot, S. Wabnitz, V. Couderc, *Spatial beam self-cleaning in multimode fibres*, Nature Photon. 11, 237 (2017)
- [4] A. Fusaro, J. Garnier, K. Krupa, G. Millot, A. Picozzi, *Dramatic acceleration of wave condensation mediated by disorder in multimode fibers*, Phys. Rev. Lett. 122, 123902 (2019)
- [5] K. Baudin, A. Fusaro, K. Krupa, J. Garnier, S. Rica, G. Millot, A. Picozzi, *Classical Rayleigh-Jeans condensation of light waves: Observation and thermodynamic characterization*, Phys. Rev. Lett. 125, 244101 (2020)
- [6] J. Garnier, K. Baudin, A. Fusaro, A. Picozzi, *Coherent soliton states hidden in phase-space and stabilized by gravitational incoherent structures*, Phys. Rev. Lett. 127, 014101 (2021)

#### **Connaissances et compétences requises :**

Goût prononcé pour la théorie, les simulations numériques, avec des connaissances de base en optique non linéaire, turbulence et mécanique statistique. Motivation à s'impliquer dans les expériences de validation utilisant des lasers et des fibres optiques. Bon esprit de synthèse en vue de la rédaction de publications scientifiques en anglais.

# PhD Thesis Proposal

**Title:** *Wave turbulence in disordered multimode optical fibers*

**Laboratory:** *Laboratoire ICB – UMR 6303*

## **PhD Supervisor:**

*Supervisor:* Picozzi Antonio, Antonio.Picozzi@u-bourgogne.fr

*Co-supervisor:* Garnier Josselin, Josselin.Garnier@polytechnique.edu

*Co-supervisor:* Millot Guy, Guy.Millot@u-bourgogne.fr

**Research fields:** *Wave turbulence, Nonlinear optics*

**Grant:** French Government

## **Context:**

Turbulence of random waves arises in many natural research fields (surface sea, Bose-Einstein condensates, astrophysics and nonlinear optics). It constitutes a major research field in contemporary physics. The PhD project is aimed at studying optical turbulence in the presence of a structural disorder, which is always present in Nature. The wave turbulence theory relies on the statistical description of the interactions of an ensemble of random nonlinear waves. In the weakly nonlinear regime and in the absence of disorder, systematic methods have been developed in the general framework of the wave turbulence theory, which has been successfully applied in a large variety of physics domains. Nonlinear optics allows for the study of wave turbulence in the framework of relatively simple experiments, where various phenomenological behaviours have been identified on the basis of different wave turbulence formalisms (wave condensation in analogy with Bose-Einstein condensation, or the formation of large scale incoherent structures in analogy with gravitation and the formation of galaxies in the Universe) [1].

## **Scientific project:**

In this project combining theory, numerical simulations and experimental validation, we plan to extend various aspects of optical wave turbulence by taking into account a structural disorder of the nonlinear propagation medium. Indeed, light propagation in conventional multimode optical fibres is known to be affected by a disorder due to structural imperfections or external perturbations [2]. Theoretical developments will be analyzed by numerical simulations, which will allow the design of experiments to be carried out within the SAFIR team of ICB. The impact of disorder on wave condensation will be studied in relation with the effect of spatial beam cleaning [3], whose underlying mechanisms are still poorly understood [4-5]. We will consider the extension to the spatio-temporal domain of the phenomenon of wave condensation identified in the pure spatial domain and the possibility to observe thermodynamic equilibrium states characterized by negative temperatures [collaboration Un. Trento, BEC Center, Italie]. We will also study the role of a

geometrical disorder of the system in the framework of chaotic optical fibers (truncated cross section), in relation with chaotic billiards [collaboration Un. Cote d'Azur, Nice]. In analogy with gravitational interactions [6], we will also study the thermalization of optical waves in the presence of long-range interactions in a guided wave configuration [collaboration Un. Glasgow, UK].

The thesis work will be carried out in the framework of the Graduate School EIPHI. It will take advantage of the top leading equipments of the EquipEx+ SMARTLIGHT project. During his thesis, the PhD student will participate in several national and international conferences as well as in international thematic schools. He will have the opportunity to carry out research stays in external teams of great reputation. In addition to the collaborations already mentioned, he will benefit from interactions with colleagues from the Photonics and ICQ departments, as well as from the support of the joint services of mechanics, computer science and electronics at ICB. He may also be given teaching assignments in the Bachelor's program.

### **References:**

- [1] A. Picozzi, J. Garnier, T. Hansson, P. Suret, S. Randoux, G. Millot, D. Christodoulides, *Optical wave turbulence: Toward a unified nonequilibrium thermodynamic formulation of statistical nonlinear optics*, Physics Reports 542, 1-132 (2014)
- [2] I.P. Kaminow, T. Li, and A.F. Willner, *Optical Fiber Telecommunications, Systems and Networks* (Sixth Ed., Elsevier, 2013)
- [3] K. Krupa, A. Tonello, B.M. Shalaby, M. Fabert, A. Barthélémy, G. Millot, S. Wabnitz, V. Couderc, *Spatial beam self-cleaning in multimode fibres*, Nature Photon. 11, 237 (2017)
- [4] A. Fusaro, J. Garnier, K. Krupa, G. Millot, A. Picozzi, *Dramatic acceleration of wave condensation mediated by disorder in multimode fibers*, Phys. Rev. Lett. 122, 123902 (2019)
- [5] K. Baudin, A. Fusaro, K. Krupa, J. Garnier, S. Rica, G. Millot, A. Picozzi, *Classical Rayleigh-Jeans condensation of light waves: Observation and thermodynamic characterization*, Phys. Rev. Lett. 125, 244101 (2020)
- [6] J. Garnier, K. Baudin, A. Fusaro, A. Picozzi, *Coherent soliton states hidden in phase-space and stabilized by gravitational incoherent structures*, Phys. Rev. Lett. 127, 014101 (2021)

### **Required skills :**

Strong interest in theory, numerical simulations, with some basic knowledge in nonlinear optics, turbulence and statistical mechanics. Motivation to get involved in experiments using lasers and multimode optical fibers. Good ability to synthesize information for scientific publications in English.