

Proposition de sujet de thèse – 2022

Sujet de thèse proposé : **Lasers à fibres multimodes ultrarapides**

Intitulé en anglais : **Ultrafast multimode fiber lasers**

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

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

Pr. Philippe GRELU : philippe.grelu@u-bourgogne.fr

Dr. Aurélien COILLET : aurelien.coillet@u-bourgogne.fr

Domaine scientifique principal de la thèse : Physique

Domaine scientifique secondaire de la thèse : Photonique

Financement envisagé : **Bourse Ministère**

Contexte du projet de Recherche :

Les lasers à fibre sont en développement constant, car ils combinent de nombreux avantages : un rendement élevé, une excellente qualité spatiale du faisceau, une architecture flexible et une évolutivité de la puissance délivrée. Ils peuvent être conçus pour générer des impulsions ultracourtes avec des applications en médecine, spectroscopie, LIDAR, traitement des matériaux, etc. Les lasers à fibre ultrarapides constituent également une plate-forme unique pour tester une grande diversité de dynamiques complexes, telles que les molécules et cristaux de solitons optiques, les ondes extrêmes (ondes scélérates) - domaines de recherche fondamentale où nous bénéficions d'une expertise reconnue [1,2].

Jusqu'à récemment, on pensait que la génération d'impulsions ultracourtes nécessitait une cavité laser fonctionnant selon un seul mode transverse, en raison de l'impact défavorable de la dispersion intermodale, qui semble incompatible avec le maintien d'un profil de faisceau cohérent et ultracourt. Des recherches récentes ont montré que des conditions spécifiques permettent le verrouillage de mode avec quelques modes transversaux [3]. Ces nouvelles découvertes pourront avoir des applications notables, telles que l'accroissement de la gamme de puissance des lasers ultrarapides compacts. Ils apportent également de nouveaux outils d'investigation à un domaine fascinant de la recherche fondamentale, à savoir la dynamique spatio-temporelle ultrarapide.

Description du projet scientifique :

En développant des cavités laser à fibres multimodes ultrarapides, nous explorerons une nouvelle gamme de dynamiques spatio-temporelles. Ces dynamiques incluent le verrouillage simultané des modes de cavité longitudinaux et transversaux (verrouillage de mode spatio-temporel), l'auto-nettoyage du profil d'un faisceau multimode [4], ainsi que la formation de molécules de solitons tridimensionnelles. L'objectif de cette thèse est de développer

expérimentalement des lasers à fibre ultrarapides multimodes et mettre en œuvre des techniques de caractérisation spatio-temporelle permettant d'étudier les nouveaux phénomènes physiques. Notre laboratoire est bien équipé pour construire diverses architectures laser et effectuer des caractérisations en optique ultrarapide, mais le domaine multimode est récent et nécessite de nouveaux développements expérimentaux, activité également en développement marqué au niveau international. Cette thèse bénéficiera de collaborations avec l'Université de Limoges, France, l'Université de Novossibirsk, Russie, et l'Université La Sapienza de Rome, Italie. Nous prévoyons également d'inclure des techniques d'intelligence artificielle et d'optimisation d'algorithmes génétiques pour piloter la dynamique laser ultrarapide [5,6].

References

- [1] Ph. Grelu & N. Akhmediev, Dissipative solitons for mode-locked lasers, *Nature Photonics* 6, 84–92 (2012).
- [2] Z. Wang et al., Optical soliton molecular complexes in a passively mode-locked fibre laser, *Nature Communications* 10, 830 (2019).
- [3] L. Wright et al., Spatiotemporal mode-locking in multimode fiber lasers *Science* 358, 94–97 (2017).
- [4] K. Krupa et al. Spatial beam self-cleaning in multimode fiber, *Nature Photonics* 11(4) (2017).
- [5] J. Girardot, F. Billard, A. Coillet, E. Hertz and Ph. Grelu, Autosetting Mode-Locked Laser Using an Evolutionary Algorithm and Time-Stretch Spectral Characterization, *IEEE JSTQE* 26, 1100108 (2020).
- [6] Ph. Grelu “Smart lasers tame complex spatiotemporal cavity dynamics,” *Light: Sci. Appl.* 9:188 (2020).

Connaissances et compétences requises :

Formation académique en photonique concernant notamment : l'optique non linéaire, la fibre optique, la physique des lasers, la caractérisation ultrarapide. Une formation numérique (Matlab/ C++/Python) et une expérience en instrumentation (acquisition et traitement de données) seront appréciées. Anglais (écrit/parlé) niveau B2.

PhD Thesis Proposal

Title: Ultrafast multimode fiber lasers

Laboratory: Laboratoire ICB – UMR 6303

PhD Supervisors: Prof. Philippe GRELU, Dr. Aurélien COILLET

Research fields: Photonics: ultrafast laser dynamics, nonlinear fiber optics, fiber laser modeling and experimental development

Grant: French Government

Context: Fiber lasers are in constant development, as they combine numerous advantages, such as high efficiency, excellent beam quality and brightness, flexible cavity design and power

scalability. They can be designed to generate ultrashort pulses with applications in medicine, spectroscopy, LIDAR, material processing and so on. Ultrafast fiber lasers also constitute a unique platform to test a variety of pattern formations and complex dynamics, such as optical soliton molecules, crystals, extreme waves (optical rogue waves) – a fundamental research area where we have a leading expertise [1,2].

Until recently, it was thought that ultrashort pulse generation required a laser cavity operating in a single transverse mode. The reason is that the large intermodal dispersion looks incompatible with maintaining over successive cavity roundtrips a coherent and ultrashort beam profile. Recent investigations showed that specific conditions do allow mode locking with a few transverse modes [3]. These new findings entail important applications, such as increasing the power range of compact ultrafast lasers. They also bring new investigation tools to a fascinating area of fundamental research, namely ultrafast spatiotemporal dynamics. This area, which has typically been the ground of laser filamentation involving complex and bulky experimental systems, is now open for a more systematic investigation using the versatile and convenient fiber laser platform.

Scientific project: In this proposal, by using multimode ultrafast fiber laser cavities, we anticipate exploring a full new range of spatiotemporal dynamics. These dynamics include the simultaneous locking of both longitudinal and transverse cavity modes (spatiotemporal mode locking), multimode beam cleanup [4], as well as the formation of three-dimensional soliton molecules. Therefore, the aim of this thesis is to develop experimentally multimode ultrafast fiber lasers, as well as to implement the spatiotemporal characterization techniques required to investigate new physical phenomena, such as complex pattern formations. Our fiber laser lab is well equipped to build various laser architectures and perform ultrafast optical characterization. However, multimode ultrafast lasers represent a new activity, which is also attracting a growing focus from the international research scene. This thesis will benefit from national and international collaborations, such as with University of Limoges, France, University of Novosibirsk, Russia, and University La Sapienza of Rome, Italy. We also plan to include techniques or artificial intelligence and genetic algorithm optimization to pilot the ultrafast laser dynamics [5,6].

References

- [1] Ph. Grelu & N. Akhmediev, Dissipative solitons for mode-locked lasers, *Nature Photonics* 6, 84–92 (2012).
- [2] Z. Wang et al., Optical soliton molecular complexes in a passively mode-locked fibre laser, *Nature Communications* 10, 830 (2019).
- [3] L. Wright et al., Spatiotemporal mode-locking in multimode fiber lasers *Science* 358, 94–97 (2017).
- [4] K. Krupa et al. Spatial beam self-cleaning in multimode fiber, *Nature Photonics* 11(4) (2017).
- [5] J. Girardot, F. Billard, A. Coillet, E. Hertz and Ph. Grelu, Autosetting Mode-Locked Laser Using an Evolutionary Algorithm and Time-Stretch Spectral Characterization, *IEEE JSTQE* 26, 1100108 (2020).
- [6] Ph. Grelu “Smart lasers tame complex spatiotemporal cavity dynamics,” *Light: Sci. Appl.* 9:188 (2020).

Required skills Academic background in photonics concerning in particular: nonlinear optics, fiber optics, laser physics, ultrafast characterization. Numerical background (Matlab/C++/Python) and experience in instrumentation (data acquisition and processing) will be appreciated. English (written/spoken) level B2.