

### Proposition d'un sujet de thèse

**Sujet:** Ondes en milieux désordonnés et la théorie d'information  
**Laboratoire:** [Laboratoire de Physique et Modélisation des Milieux Condensés \(LPMMC\)](#)  
**Directeur de thèse:** [Sergey Skipetrov](#)  
**Contact:** <http://lpmmc.cnrs.fr/skipetrov>, [Sergey.Skipetrov@lpmmc.cnrs.fr](mailto:Sergey.Skipetrov@lpmmc.cnrs.fr), (+33) 4 76 88 74 97

#### Résumé:

La propagation des ondes en milieux désordonnés est un sujet de recherche d'actualité avec de nombreuses questions en suspens et d'importantes applications pratiques [1]. L'approche traditionnelle consiste à étudier des grandeurs liées à l'énergie : l'intensité moyenne et ses fluctuations, coefficients de transmission et de réflexion, statistiques de la densité d'états, étendue spatiale des modes propres, etc. [2]. Toutes ces propriétés caractérisent l'accumulation et le transport de l'énergie des ondes, ce qui est important pour de nombreuses applications pratiques: l'imagerie, le diagnostic non invasif, l'optique non linéaire, les cellules solaires, etc. Cependant, dans notre société moderne, on utilise de plus en plus souvent des milieux et des ondes pour stocker et transférer de l'information, ce qui est lié mais pas exactement équivalent au stockage et au transfert de l'énergie. Les questions type qui se posent dans ce contexte peuvent être les suivantes :

- Quelle quantité d'informations peut-on encoder dans un milieu désordonné d'une taille donnée ou quelle est la capacité d'information d'un milieu désordonné ?
- Quelle est la capacité d'information d'un canal de communication désordonné [3,4] ?
- Un milieu désordonné peut-il être utilisé pour le codage sécurisé d'information ou comme une clé d'authentification [5,6] ?
- Comment le désordre affecte-t-il l'information quantique codée par les photons intriqués [7] ?

Toutes ces questions, ainsi que d'autres questions similaires, ont un intérêt pratique évident, mais aussi une importance fondamentale, car elles permettent de revenir sur les phénomènes d'interférence des ondes dans une perspective différente, celle de la théorie d'information [8].

Ce **projet théorique** sera mené en collaboration avec l'équipe de F. Riboli (Florence, Italie) qui effectue des expériences optiques dans des milieux fortement désordonnés à deux et trois dimensions [9]. La collaboration permettra une comparaison directe des résultats théoriques avec les expériences mais également une possibilité de proposer de nouvelles expériences basées sur les résultats théoriques. La capacité d'information d'un milieu désordonné sera d'abord étudiée dans un modèle scalaire à deux dimensions, puis dans un modèle vectoriel complet à trois dimensions, en prenant en compte les éventuels effets de la localisation d'Anderson dus au désordre. L'impact de la localisation d'Anderson sur la capacité d'information sera étudié. La capacité d'information d'un canal de communication désordonné sera d'abord considérée sur un exemple d'un guide d'ondes désordonné quasi unidimensionnel qui constitue un bon modèle pour une fibre optique désordonnée, puis généralisée aux milieux bidimensionnels et tridimensionnels. L'utilisation d'un milieu désordonné comme clé de codage ou d'authentification sera étudiée dans la seconde partie du projet de thèse, tandis que la dernière partie de la thèse sera consacrée aux limitations et aux possibilités supplémentaires dues à la nature quantique de la lumière.

Le candidat à ce projet de thèse devrait avoir un goût pour la physique théorique, des compétences en calcul analytique et un minimum d'expérience en calcul numérique.

#### Bibliographie

1. S. Rotter and S. Gigan, [Light fields in complex media: Mesoscopic scattering meets wave control](#), Rev. Mod. Phys. **89**, 015005 (2017)
2. E. Akkermans and G. Montambaux, [Mesoscopic Physics of Electrons and Photons](#) (Cambridge University Press, Cambridge, 2007)
3. A.L. Moustakas, H.U. Baranger, L. Balents, A.M. Sengupta, and S.H. Simon, [Communication through a diffusive medium: Coherence and capacity](#), Science **287**, 287-290 (2000)
4. S.E. Skipetrov, [Information transfer through disordered media by diffuse waves](#), Phys. Rev. E **67**, 036621 (2003)
5. R. Pappu, B. Recht, J. Taylor, and N. Gershenfeld, [Physical One-Way Functions](#), Science **297**, 2026 (2002)
6. S.A. Goorden, M. Horstmann, A.P. Mosk, B. Škorić, and P.W.H. Pinkse, [Quantum-secure authentication of a physical unclonable key](#), Optica **1**, 421 (2014)
7. M. Candé, A. Goetschy, and S.E. Skipetrov, [Transmission of quantum entanglement through a random medium](#), EPL **107**, 54004 (2014)
8. N. Fayard, A. Goetschy, R. Pierrat, and R. Carminati, [Mutual Information between Reflected and Transmitted Speckle Images](#), Phys. Rev. Lett. **120**, 073901 (2018)
9. F. Riboli, F. Ucheddu, G. Monaco, N. Caselli, F. Intonti, M. Gurioli, S.E. Skipetrov, [Tailoring Correlations of the Local Density of States in Disordered Photonic Materials](#), Phys. Rev. Lett. **119**, 043902 (2017)



### PhD thesis proposal

**Subject:** Waves in disordered media and the information theory  
**Laboratory:** [Laboratoire de Physique et Modélisation des Milieux Condensés \(LPMMC\)](#)  
**Supervisor:** [Sergey Skipetrov](#)  
**Contact:** <http://lpmmc.cnrs.fr/skipetrov>, [Sergey.Skipetrov@lpmmc.cnrs.fr](mailto:Sergey.Skipetrov@lpmmc.cnrs.fr), (+33) 4 76 88 74 97

#### Summary:

Wave propagation in disordered media is a subject of ongoing research with many open questions and important practical applications [1]. The traditional approach to this problem consists in studying energy-related quantities: average intensity and its fluctuations, transmission and reflection coefficients, statistics of the density of states, spatial extent of eigenmodes, etc. [2]. All these properties characterize the accumulation and transport of wave energy, which is important for many practical applications: imaging, noninvasive diagnostics, nonlinear optics, solar cells, etc. However, in our modern society both material media and waves are more and more often used to transfer *information*, which is related but not exactly equivalent to *energy* storage and transfer. Typical questions that arise in this context may be the following:

- How much information can one encode in a disordered medium of a given size or what is the information capacity of a disordered medium?
- What is the information capacity of a disordered communication channel [3,4]?
- Can a disordered medium be used for secure coding of information or as an authentication key [5,6]?
- How does disorder affect quantum information encoded in entangled photons [7]?

All these and similar questions have an obvious practical significance but also a fundamental importance because they allow to revisit wave interference phenomena from a different, information-theoretic perspective [8].

This **theoretical project** will be conducted in collaboration with the team of F. Riboli (Florence, Italy) who perform optical experiments in two- and three-dimensional strongly disordered media [9]. The collaboration will allow for a direct comparison of theoretical results with experiments but also for a possibility to propose new experiments based on the theoretical results. The information capacity of a disordered medium will be first studied in a two-dimensional scalar model and then in a full three-dimensional vector model that properly takes into account the possible Anderson localization effects due to disorder. The impact of Anderson localization on the information capacity will be investigated. The information capacity of a disordered communication channel will be first considered on an example of a disordered quasi-one-dimensional waveguide which is a good model for a disordered optical fiber, and then generalized to two- and three-dimensional media. The use of a disordered medium as an encoding or authentication key will be studied in the second part of the thesis project, whereas the final part of the thesis will be devoted to limitations and supplemental possibilities due to the quantum nature of light.

The candidate for this thesis project is expected to have a taste for theoretical physics, analytical calculation skills, and a minimum of experience in numerical computation.

#### Bibliography

1. S. Rotter and S. Gigan, [Light fields in complex media: Mesoscopic scattering meets wave control](#), Rev. Mod. Phys. **89**, 015005 (2017)
2. E. Akkermans and G. Montambaux, [Mesoscopic Physics of Electrons and Photons](#) (Cambridge University Press, Cambridge, 2007)
3. A.L. Moustakas, H.U. Baranger, L. Balents, A.M. Sengupta, and S.H. Simon, [Communication through a diffusive medium: Coherence and capacity](#), Science **287**, 287-290 (2000)
4. S.E. Skipetrov, [Information transfer through disordered media by diffuse waves](#), Phys. Rev. E **67**, 036621 (2003)
5. R. Pappu, B. Recht, J. Taylor, and N. Gershenfeld, [Physical One-Way Functions](#), Science **297**, 2026 (2002)
6. S.A. Goorden, M. Horstmann, A.P. Mosk, B. Škorić, and P.W.H. Pinkse, [Quantum-secure authentication of a physical unclonable key](#), Optica **1**, 421 (2014)
7. M. Candé, A. Goetschy, and S.E. Skipetrov, [Transmission of quantum entanglement through a random medium](#), EPL **107**, 54004 (2014)
8. N. Fayard, A. Goetschy, R. Pierrat, and R. Carminati, [Mutual Information between Reflected and Transmitted Speckle Images](#), Phys. Rev. Lett. **120**, 073901 (2018)
9. F. Riboli, F. Ucheddu, G. Monaco, N. Caselli, F. Intonti, M. Gurioli, S.E. Skipetrov, [Tailoring Correlations of the Local Density of States in Disordered Photonic Materials](#), Phys. Rev. Lett. **119**, 043902 (2017)