

M2 Internship / PhD Proposal

Tensor-based wavefront shaping for dynamic complex media

Laboratoire LuMin, ENS Paris-Saclay

Summary

This project seeks to develop a tensor-based framework to describe and control light's propagation through dynamic complex media, which include highly scattering media and multimode fibers. This framework will first be verified experimentally using a wavefront shaping setup and a synthetic dynamic medium implemented with a fast spatial light modulator (SLM) to measure the intensity transmission tensor. Likewise, numerical simulations will be carried out to corroborate the experimental results. Then, the transmission tensor will be exploited using tensor decomposition techniques and nonlinear optimizations to find the input field required to achieve a desired task, such as maximizing energy transport through the system. The project includes experimental, numerical and theoretical components, and the emphasis on each can be tailored to the student's preferences.

Context and positioning

When light propagates through complex media, such as biological tissue, paint, clouds or even multimode fibers, it is mixed into a high number of degrees of freedom. This leads to the observation of a seemingly random speckle pattern at the output, as shown in Fig. 1. While the process leading to the generation of this intricate interference pattern is complex, the response of the system between a set of input and output modes is fully represented by a transmission matrix (TM) due to the deterministic and linear nature of the propagation of light in such media. Once measured using wavefront shaping techniques, this matrix gives us full control over the wave propagation [1], and can be used to image through highly scattering biological tissue, or transmit information through multimode fibers [2].

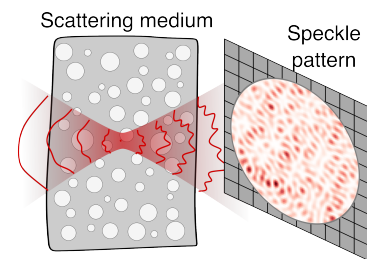


Figure 1 | Speckle forming by a scattering medium.

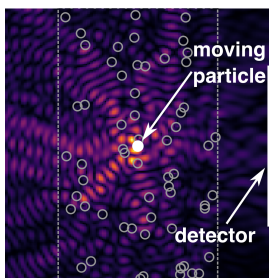


Figure 2 | Focusing light inside a scattering medium.

However, changes to the media due to external perturbations or its own dynamical evolution entail changes in the TM, thus rendering our previous knowledge approximate at best. For changes due to a single parameter, it remains possible to use the TM to find input fields that avoid the perturbation, which is good for imaging or telecommunications [3, 4] and, conversely, input fields that maximize the interaction with it, which is good for sensing [5]. An example is shown in Fig. 2, where the input field has been structured to maximize the interaction with a moving particle. Recently, it was even shown that for media with localized dynamics it is possible to define an averaged TM [6] and use it to avoid the dynamic parts of the medium. But when the changes are distributed across the medium and are due to several parameters, such as the stochastic movement of several particles or the noise coming from mechanical vibrations along several points of a multimode fiber, it is no longer possible to define or measure a TM.

This project seeks to fill this gap by developing a framework that can describe the propagation of light through complex media that have fast and periodic dynamics. In this type of media, the output field becomes partially coherent and thus only its output intensity distribution can be measured. This establishes a nonlinear relation between the input field and the output measured distribution. Nonetheless, in some preliminary results [5], it was shown that higher-order tensors can describe this type of nonlinear relation. This will lead us to define an intensity transmission tensor (ITT) that will be used to regain full control over the wave propagation in dynamic media. Once this ITT is known, it will be shown that tensor decomposition techniques—a tool from machine learning and applied mathematics [7]—can be used to find input fields that perform a desired task, for example, maximizing the delivery of energy.

Objectives

The main objective of this project is to verify experimentally and numerically the validity of the ITT for describing fast dynamical media. For the experimental components, the student will build a wavefront shaping system in order to shape the input field, and construct a synthetic dynamical complex media by using an ultra-fast SLM in a multiplane configuration as shown in Fig. 3. It will also be necessary to develop the python code to analyze all the data and reconstruct the ITT. Tensor decomposition algorithms will be developed using either nonlinear optimizations, implemented using the machine learning framework PyTorch, or iterative methods. For the numerical component, the student will develop python code to model light's propagation through dynamic disordered media using the coupled-dipole method, as shown in Fig. 2, and the recursive Green function method.

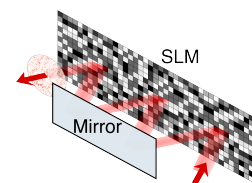


Figure 3 | Multiplane model for complex media.

Profile and skills required

The applicant is expected to have a taste for wave physics, theory, and code. The project will require an extensive use of Python for interfacing, data acquisition, post-processing and numerical simulations.

Contacts

Rodrigo Gutiérrez Cuevas, rodrigo.gutierrez@ens-paris-saclay.fr
Francois Marquier, francois.marquier@ens-paris-saclay.fr

References

- [1] Popoff, S. M. *et al.* Measuring the transmission matrix in optics: An approach to the study and control of light propagation in disordered media. *Phys. Rev. Lett.* **104**, 100601 (2010).
- [2] Gigan, S. *et al.* Roadmap on wavefront shaping and deep imaging in complex media. *J. Phys. Photonics* **4**, 042501 (2022).
- [3] Matthès, M. W., Bromberg, Y., de Rosny, J. & Popoff, S. M. Learning and avoiding disorder in multimode fibers. *Phys. Rev. X* **11**, 021060 (2021).
- [4] Gutiérrez-Cuevas, R. *et al.* Characterization and exploitation of the rotational memory effect in multimode fibers. *Phys. Rev. X* **14**, 031046 (2024).
- [5] Gutiérrez-Cuevas, R., Bouchet, D., de Rosny, J. & Popoff, S. M. Reaching the precision limit with tensor-based wavefront shaping. *Nat. Commun.* **15**, 6319 (2024).
- [6] Mididoddi, C. K., Sharp, C., del Hougne, P., Horsley, S. A. R. & Phillips, D. B. Threading light through dynamic complex media (2023). <https://arxiv.org/abs/2301.04461>.
- [7] Kolda, T. G. & Bader, B. W. Tensor decompositions and applications. *SIAM Review* **51**, 455–500 (2009).

Proposition de stage M2 / thèse

Approche tensorielle pour le façonnage du front d'onde dans des milieux complexes dynamiques

Laboratoire LuMin, ENS Paris-Saclay

Résumé

Ce projet vise à développer un cadre tensoriel pour décrire et contrôler la propagation de la lumière dans des milieux complexes dynamiques tels que des milieux diffusants et des fibres multimodes. Ce cadre sera validé expérimentalement via un système de façonnage d'onde et un milieu dynamique synthétique créé à l'aide d'un modulateur spatial de lumière (SLM) rapide pour mesurer le tenseur de transmission d'intensité. Des simulations numériques seront également effectuées pour corroborer les résultats expérimentaux. Ensuite, le tenseur de transmission sera exploité en utilisant des techniques de décomposition tensorielle et des optimisations non-linéaires pour identifier le champ d'entrée nécessaire pour réaliser une tâche donnée, comme maximiser le transport d'énergie. Le projet inclut des composantes expérimentales, numériques et théoriques, avec un accent adaptable selon les préférences de l'étudiant.

Contexte et positionnement

Lorsque la lumière se propage à travers des milieux complexes, tels que des tissus biologiques, de la peinture, des nuages ou des fibres multimodes, elle se mélange dans un grand nombre de degrés de liberté. Cela conduit à l'observation d'un motif de speckle apparemment aléatoire à la sortie, comme illustré dans la Fig. 1. Bien que le processus de génération de ce motif d'interférences complexe soit difficile à analyser, la réponse du système entre un ensemble de modes d'entrée et de sortie est entièrement représentée par une matrice de transmission (TM) grâce à la nature déterministe et linéaire de la propagation de la lumière dans de tels milieux. Une fois mesurée à l'aide de techniques de façonnage du front d'onde, cette matrice permet un contrôle total de la propagation des ondes [1], et peut être utilisée pour imager à travers des tissus biologiques hautement diffusants ou transmettre des informations via des fibres multimodes [2].

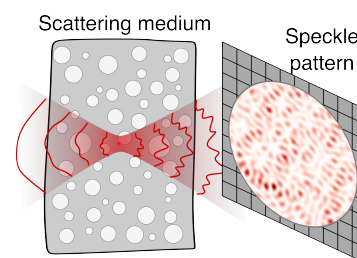


Figure 1 | Speckle formé par un milieu diffusant.

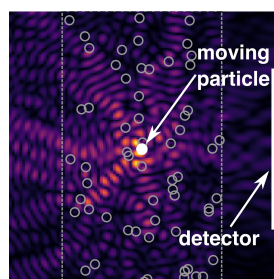


Figure 2 | Focalisation de la lumière dans un milieu diffusant.

Cependant, les changements dans les milieux dus à des perturbations externes ou à leur propre évolution dynamique entraînent des modifications dans la TM, rendant ainsi les connaissances précédentes approximatives au mieux. Pour les changements dus à un seul paramètre, il reste possible d'utiliser la TM pour trouver des champs d'entrée évitant la perturbation, ce qui est utile pour l'imagerie ou les télécommunications [3, 4], et, inversement, des champs d'entrée qui maximisent l'interaction avec celle-ci, ce qui est pertinent pour développer des capteurs [5]. Un exemple est montré dans la Fig. 2, où le champ d'entrée a été structuré pour maximiser l'interaction avec une particule en mouvement. Récemment, il a même été démontré que pour des milieux ayant une dynamique localisée, il est possible de définir une TM moyennée [6] et de l'utiliser pour éviter les parties dynamiques du milieu. Mais lorsque les changements sont distribués dans tout le milieu et sont dus à plusieurs paramètres, tels que le mouvement stochastique de plusieurs particules ou le bruit provenant de vibrations mécaniques le long de plusieurs points d'une fibre multimode, il n'est plus possible de définir ou de mesurer une TM.

Ce projet vise à combler cette lacune en développant un cadre permettant de décrire la propagation de la lumière dans des milieux complexes avec des dynamiques rapides et périodiques. Dans ce type de milieux, le champ de sortie devient partiellement cohérent et seule sa distribution d'intensité en sortie peut être mesurée. Cela établit une relation non linéaire entre le champ d'entrée et la distribution mesurée en sortie. Néanmoins, dans des résultats

préliminaires [5], il a été montré que des tenseurs d'ordre supérieur peuvent décrire ce type de relation non linéaire. Cela nous conduira à définir un tenseur de transmission d'intensité (ITT) qui sera utilisé pour regagner un contrôle total sur la propagation des ondes dans des milieux dynamiques. Une fois cet ITT connu, il sera démontré que des techniques de décomposition tensorielle—un outil issu de l'apprentissage automatique et des mathématiques appliquées [7]—peuvent être utilisées pour trouver des champs d'entrée permettant de réaliser une tâche donnée, par exemple maximiser le transport d'énergie.

Objectifs

L'objectif principal de ce projet est de vérifier expérimentalement et numériquement la validité de l'ITT pour décrire les milieux dynamiques rapides. Pour les composantes expérimentales, l'étudiant construira un système de façonnage du front d'onde afin de structurer le champ d'entrée et concevra un milieu complexe dynamique synthétique en utilisant un SLM ultra-rapide dans une configuration multi-plans comme montré dans la Fig. 3. Il sera également nécessaire de développer un code Python pour analyser toutes les données et reconstruire l'ITT. Les algorithmes de décomposition tensorielle seront développés soit à l'aide d'optimisations non linéaires, implémentées via le framework d'apprentissage machine PyTorch, soit par des méthodes itératives. Pour la partie numérique, l'étudiant développera un code Python pour modéliser la propagation de la lumière dans des milieux désordonnés dynamiques en utilisant la méthode des dipôles couplés (Fig. 2) et la méthode récursive de fonction de Green.

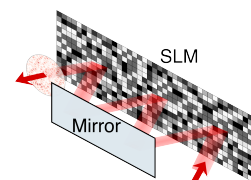


Figure 3 | Modèle multi-plans pour les milieux complexes.

Profil et compétences requises

Le candidat doit avoir un goût pour la physique des ondes, la théorie et le codage. Le projet nécessitera une utilisation intensive de Python pour l'interfaçage, l'acquisition de données, le post-traitement et les simulations numériques.

Contacts

Rodrigo Gutiérrez Cuevas, rodrigo.gutierrez@ens-paris-saclay.fr

Francois Marquier, francois.marquier@ens-paris-saclay.fr

References

- [1] Popoff, S. M. *et al.* Measuring the transmission matrix in optics: An approach to the study and control of light propagation in disordered media. *Phys. Rev. Lett.* **104**, 100601 (2010).
- [2] Gigan, S. *et al.* Roadmap on wavefront shaping and deep imaging in complex media. *J. Phys. Photonics* **4**, 042501 (2022).
- [3] Matthès, M. W., Bromberg, Y., de Rosny, J. & Popoff, S. M. Learning and avoiding disorder in multimode fibers. *Phys. Rev. X* **11**, 021060 (2021).
- [4] Gutiérrez-Cuevas, R. *et al.* Characterization and exploitation of the rotational memory effect in multimode fibers. *Phys. Rev. X* **14**, 031046 (2024).
- [5] Gutiérrez-Cuevas, R., Bouchet, D., de Rosny, J. & Popoff, S. M. Reaching the precision limit with tensor-based wavefront shaping. *Nat. Commun.* **15**, 6319 (2024).
- [6] Mididoddi, C. K., Sharp, C., del Hougne, P., Horsley, S. A. R. & Phillips, D. B. Threading light through dynamic complex media (2023). <https://arxiv.org/abs/2301.04461>.
- [7] Kolda, T. G. & Bader, B. W. Tensor decompositions and applications. *SIAM Review* **51**, 455–500 (2009).