

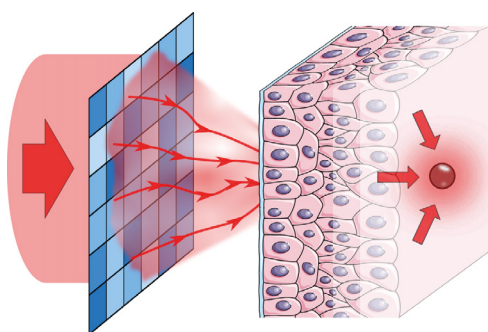
FAÇONNAGE DU FRONT D'ONDE POUR L'ÉTUDE DES MILIEUX COMPLEXES

Rodrigo GUTIÉRREZ-CUEVAS^{1,*}, Sébastien M. POPOFF²

¹Université Paris-Saclay, CNRS, ENS Paris-Saclay, CentraleSupélec, LuMIn, 91405, Orsay, France

²Institut Langevin, ESPCI Paris, Université PSL, CNRS, 75005 Paris, France

*rodrigo.gutierrez@ens-paris-saclay.fr



Le façonnage du front d'onde permet de contrôler la propagation de la lumière dans les milieux complexes. Cette approche repose sur l'utilisation de modulateurs spatiaux de lumière, permettant de contrôler le champ optique sur un grand nombre de pixels, et sur des méthodes d'optimisation du champ ou de caractérisation du milieu par des matrices de transmission. Elle ouvre l'accès à de nouvelles applications en imagerie, en télécommunications ou encore en traitement optique de l'information.

<https://doi.org/10.1051/photon/202513246>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

Les applications de façonnage du front d'onde trouvent leur origine dans le développement des techniques d'optique adaptative, où un miroir déformable ajuste sa forme afin de compenser les distorsions du front d'onde dues aux aberrations optiques et ainsi améliorer la qualité d'image de divers systèmes. Cette approche a été initialement développée pour l'astronomie et a ensuite été adaptée à la microscopie, notamment pour l'imagerie rétinienne. Dans ces systèmes, les distorsions proviennent principalement d'aberrations de bas ordre, pouvant

être corrigées avec un nombre réduit de degrés de liberté, c'est-à-dire à l'aide d'un petit nombre d'actionneurs intégrés au miroir déformable (typiquement une à quelques dizaines).

Cependant, lorsque la lumière se propage dans un milieu dit complexe, celui-ci mélange l'information spatiale portée par l'onde incidente dans un grand nombre de modes [1]. On distingue généralement trois grandes classes de milieux complexes : (i) les milieux diffusants, tels que la peinture blanche, les nuages ou les tissus biologiques ; (ii) les guides d'ondes, désordonnés ou non, notamment les fibres optiques multimodes ; et (iii)

les cavités multimodes. En optique, la majorité des travaux et des applications se concentre sur les deux premières catégories en raison de leur importance pour l'imagerie et les télécommunications. Comme illustré en figure 1, lorsqu'un tel milieu est illuminé par un faisceau cohérent, le mélange spatial conduit à l'apparition d'une figure de speckle (ou tavelure) en sortie. Cette figure d'intensité présente une structure apparemment aléatoire, constituée de maxima et de minima résultant d'interférences constructives ou destructives positionnées de manière aléatoires [1]. Pour passer de cette figure de speckle

à un point focal bien défini en sortie, il est donc nécessaire de contrôler l'onde incidente avec un grand nombre de degrés de liberté [2]. Bien qu'il existe des miroirs déformables dotés de plusieurs milliers d'actionneurs, ces dispositifs sont généralement fabriqués sur mesure pour des applications spécifiques, ce qui les rend extrêmement coûteux.

Avec l'introduction des modulateurs spatiaux de lumière, ou SLMs selon l'acronyme anglais, tels que les SLMs à cristaux liquides [3] et les matrices de micromiroirs [4], ou DMDs, une correction comparable à celle effectuée par les miroirs déformables est devenue possible, mais avec un nombre bien plus élevé de degrés de liberté grâce à la haute résolution spatiale de ces dispositifs, et à un coût bien plus raisonnable. La possibilité de façonner le front d'onde de manière reconfigurable a ouvert la voie à de nombreuses applications, notamment en imagerie et en télécommunication [1,2].

L'OUTIL : LES MODULATEURS SPATIAUX DE LUMIÈRE

Compte tenu de l'importance centrale des SLMs, nous commençons par présenter les principaux types de SLMs utilisés en laboratoire, en exposant clairement leurs avantages et inconvénients respectifs comme résumé dans la table 1.

Modulateurs à cristaux liquides

Les premiers modulateurs qui ont permis de contrôler la phase avec un grand nombre de degrés de liberté, c'est-à-dire de l'ordre ou supérieur à un million de

pixels, sont les modulateurs à cristaux liquides (abréviés de l'anglais LCOS-SLM ou, par abus de langage, simplement SLM) [3]. Originellement dérivés de la technologie d'affichage pour ordinateurs ou télévisions, ils utilisent des cristaux liquides dont l'orientation peut être contrôlée en modulant le champ électrique par l'application d'un voltage entre deux électrodes (voir figure 2). Étant biréfringents, les cristaux liquides font en sorte que, pour une onde polarisée suivant l'axe actif du modulateur, l'indice optique perçu passe de l'indice ordinaire à l'indice extraordinaire, modifiant ainsi le chemin optique et donc la phase de la lumière. Ils présentent des efficacités de diffraction élevées, supérieur à 90%, et des profondeurs de modulation supérieures à 8 bits. Bien qu'ils introduisent des aberrations modérées, celles-ci peuvent être corrigées par l'application d'un masque de phase. Leur principale limitation est un lent temps de réponse, quantifié comme le temps nécessaire pour passer de 10% à 90% d'une modulation de 2π , et de l'ordre de 100 ms. Il existe certaines versions spécialisées permettant d'atteindre de temps de l'ordre de la milliseconde.

Matrices de micromiroirs

Les dispositifs à micromiroirs numériques, ou DMD, initialement développés pour les vidéoprojecteurs, sont des systèmes micro-électromécaniques (MEMS) constitués de micromiroirs, chacun monté sur un axe et contrôlable individuellement [4]. Ces micromiroirs peuvent basculer rapidement entre deux ●●●

Table 1. Comparaison des différents types de SLM.

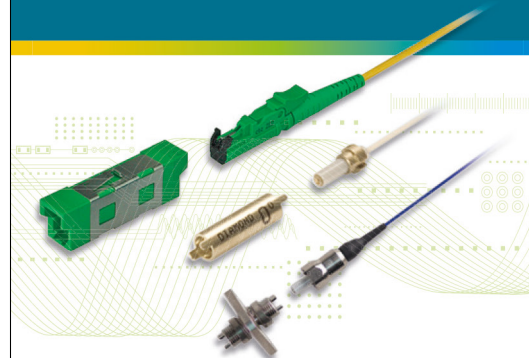
	CRISTAUX LIQUIDES	DMD	PLM
Modulation d'amplitude	Non	Binaire	Non
Modulation de phase	8-12 bits	Non	4 bits
Fréquence de modulation*	10 – 1000 Hz	1 – 10 kHz	1 kHz
Taux de remplissage	~ 95 %	~ 92 %	~ 95 %
Efficacité de diffraction**	~ 95 %	~ 8 %	~ 75 %
Coût	~ 20 000 €	1 000 – 15 000 €	~ 3 000 €
Aberrations	Modérées	Importantes	Modérées

*Pour les SLMs à cristaux liquides, on prend l'inverse du temps de réponse de 10% à 90% d'une modulation de 0 à 2π .

**Cette valeur prend en compte les pertes due à l'utilisation d'hologrammes en modulation de phase.

2BLighting Technologies

High performance and reliable fiber optic assemblies



PM+

Ultra high Polarization Extinction Ratio (PER)

- Up to +4dB higher PER
- State-of-the-art Insertion Loss (IL) and Return Loss (RL) values
- Best connector type and tolerance E-2000®, DMI, Mini AVIM® and Micro AVIM®
- Available on homologated fibres and cables



16W

E-2000® PS+

Contact expanded beam

- Low loss
- Interlock solution optional
- 1310-1550nm or 980-1060nm



100W

E-2000® PSm

Contact pump laser connector

- Low loss
- Interlock solution optional
- MM 105 0.22NA (MM 200 0.22NA optional)



www.2blighting.fr

info@2blighting.com

+33 1 64 59 21 30

positions d'inclinaison, généralement $\pm 12^\circ$ autour de sa diagonale, permettant à chaque miroir d'orienter la lumière incidente soit vers un chemin de projection, soit en dehors de celui-ci. Les DMD présentent plusieurs avantages par rapport aux SLM à cristaux liquides : ils permettent des fréquences de modulations plus élevées (de l'ordre de 10 kHz), sont insensibles à la polarisation, et sont moins onéreux, notamment pour les modèles fonctionnant autour de 1 kHz. Cependant, ils introduisent un niveau significatif d'aberrations, si elles ne sont pas correctement corrigées. Par ailleurs, bien qu'ils soient efficaces pour une modulation binaire en amplitude, en modulation de phase (en utilisant des hologrammes, voir section 3) leur efficacité de diffraction devient inférieure à 10 %.

Modulateurs MEMS de phase

Récemment, un nouveau type de SLM a été introduit sur le marché, combinant la haute efficacité de diffraction des SLM à cristaux liquides avec la rapidité de commutation des DMD. Ce dispositif, appelé modulateur de phase uniquement [5], ou PLM, est composé d'une matrice bidimensionnelle d'environ 10^6 micromiroirs, à l'image des DMD. Cependant, les PLM utilisent des MEMS pour contrôler la hauteur de chaque miroir individuellement, permettant ainsi de moduler la phase d'un faisceau lumineux incident. Les PLM ont déjà démontré des fréquences de modulation supérieures à 1 kHz et devraient atteindre des vitesses comparables à celles des DMD dans un avenir proche. Ils sont également insensibles à la polarisation et, bien qu'ils puissent introduire des aberrations,

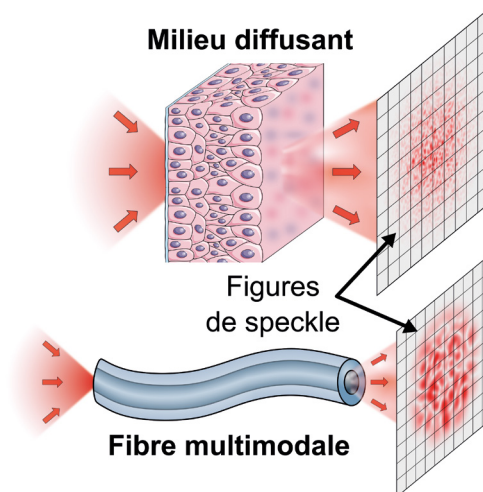


Figure 1. Propagation de la lumière dans un milieu complexe. Lorsque la lumière se propage dans un milieu complexe, le champ complexe est modifié de façon en apparence aléatoire, menant à la formation d'une figure de speckle à la sortie du milieu.

celles-ci peuvent être caractérisées et corrigées. Une limitation réside dans une profondeur de modulation plus faible, 4 bits, ce qui revient à 16 valeurs différents de phase, qui est cependant généralement suffisante pour le contrôle du front d'onde.

LES MÉTHODES : LES HOLOGRAMMES

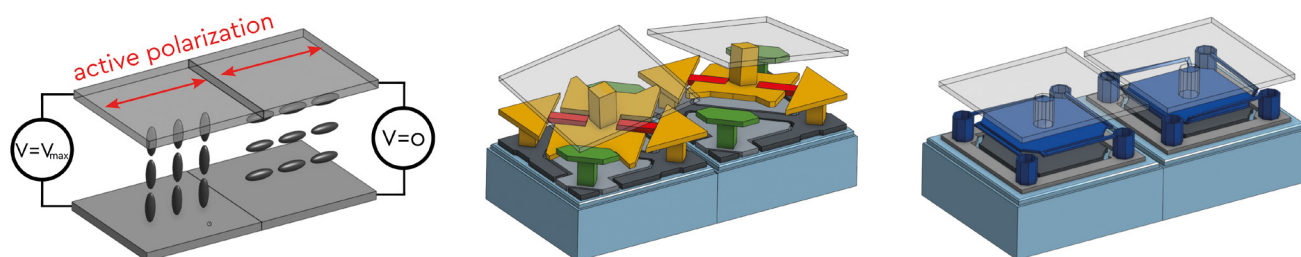
Malgré leurs limitations, tous ces types de SLM peuvent être utilisés pour façonner à la fois l'amplitude et la phase des faisceaux lumineux à l'aide d'hologrammes d'amplitude

ou de phase [3,6]. Ils reposent sur le principe illustré dans la figure 3 : la dépendance spatiale complexe du faisceau cible est encodée dans un ordre de diffraction d'un réseau en variant ses propriétés spatiales. Le faisceau cible peut ensuite être extrait en illuminant l'hologramme avec une onde plane, puis en filtrant l'ordre souhaité à l'aide d'une lentille et d'un diaphragme placé dans le plan de Fourier. Une deuxième lentille effectue une seconde transformée de Fourier pour obtenir le champ façonné. Il est aussi possible de s'affranchir de la seconde lentille en encodant le champ désiré dans la transformée de Fourier de la modulation du masque.

Hologrammes de phase

Bien que, pour de nombreuses applications, une modulation de phase seule soit suffisante, un contrôle complet de la propagation de la lumière dans un milieu complexe nécessite de pouvoir façonner à la fois l'amplitude et la phase du faisceau incident. Pour cela, on peut inscrire sur le SLM une rampe de phase linéaire et ensuite encoder le faisceau cible dans la variation spatiale des paramètres de cette rampe [3]. Notamment, pour encoder la phase, la pente de la rampe est simplement translatée, tandis que pour encoder l'amplitude, la profondeur de modulation est ajustée, permettant de moduler l'intensité allant dans l'ordre de diffraction sélectionné

Figure 2. Représentation schématique de pixels de SLMs. Gauche, pixels d'un modulateur à cristaux liquides. Le changement d'orientation de molécules biréfringentes permet de changer le chemin optique, et donc la phase, pour la polarisation active. Centre, pixels d'un modulateur à micromiroirs (DMD) composés de micromiroirs pouvant être tournés suivant deux angles pour réaliser de la modulation binaire d'amplitude. Droite, pixels d'un modulateur MEMS de phase (PLM). Chaque miroir peut être translaté suivant la normale à sa surface sur 16 niveaux (4 bits) pour réaliser de la modulation de phase.



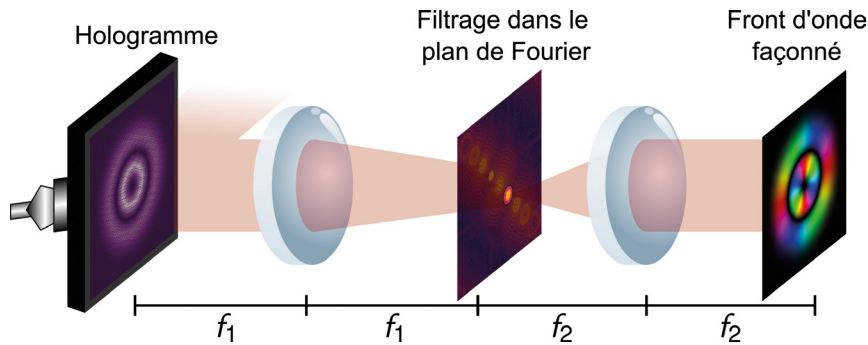


Figure 3. Façonnage de faisceaux complexes. En affichant des hologrammes de phase ou d'amplitude dans un SLM, il est possible de façonner des faisceaux en amplitude et en phase à l'aide d'un système 4f.

par l'ouverture dans le plan de Fourier. Un exemple est illustré en figure 3. En négligeant la discrétisation de la phase, cette approche peut être réalisée sans perte d'efficacité de diffraction.

Hologrammes d'amplitude binaire

En comparaison avec la modulation de phase seule, une modulation d'amplitude binaire est généralement insuffisante pour les applications de façonnage de front d'onde. Pour moduler le champ complexe, on utilise des réseaux d'amplitude binaire. En changeant la phase spatiale (*i.e.* en décalant localement les traits du réseau), on change la phase optique modulée, et en modulant le rapport cyclique (*i.e.* la largeur des traits), on change l'amplitude [6]. Un inconvénient majeur des hologrammes binaires est leur faible efficacité de diffraction, qui ne dépasse généralement pas 10%.

UTILISATION AUX MILIEUX COMPLEXES

L'émergence des techniques de modulation du front d'onde appliquées aux milieux complexes il y a près de deux décennies a donné lieu à de nombreux travaux dans des domaines très variés. L'objectif de cette section est de présenter les deux principales approches utilisées pour le contrôle des ondes dans les milieux complexes, à savoir les optimisations en boucle fermée, où le modulateur est itérativement modifié pour optimiser une propriété voulue, et la matrice de transmission, dont sa caractérisation permet de pleinement décrire un milieu

linéaire à une longueur d'onde donnée.

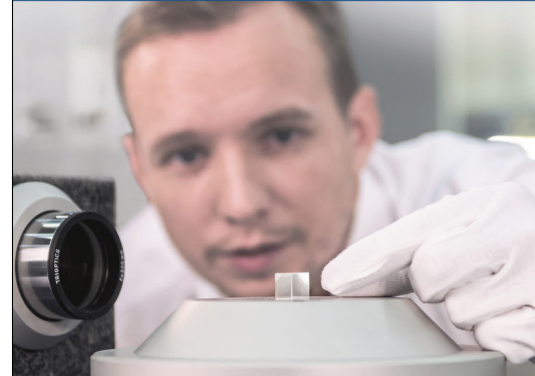
Optimisation en boucle fermée

Les premiers travaux fondateurs de contrôle du front d'onde en milieux complexes ont porté sur le problème de la focalisation en milieux diffusants [7]. De manière analogue à ce qui pré-existait en optique adaptative, le but était de séquentiellement changer la forme du front d'onde arrivant sur un milieu diffusant pour optimiser une fonction de coût, à savoir maximiser l'intensité de la lumière en un point en sortie pour focaliser la lumière (voir figure 4, gauche). La grande nouveauté de ces travaux est qu'il est possible d'apprendre expérimentalement à focaliser la lumière à travers un milieu très complexe qui ne serait pas possible de caractériser *a priori* étant paramétré par de trop nombreux degrés de liberté (*e.g.* les positions des particules diffusantes, la distribution d'indice de réfraction, etc.). L'avantage de la rétroaction sur l'entrée est que le milieu peut être arbitrairement complexe, voire même non-linéaire ou dynamique.

Matrice de transmission

Bien que souvent qualifiés de milieux aléatoires, les milieux complexes statiques étudiés ici sont déterministes. En effet, envoyer plusieurs fois le même front d'onde produit toujours la même réponse. Dans un système linéaire, la relation entre les éléments d'une base d'entrée (par exemple, les pixels du modulateur) et ceux d'une base de sortie (par exemple, les pixels d'une caméra) est entièrement décrite par ●●●

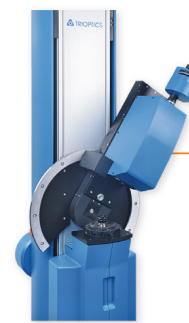
Instrumentation de test optique



Mesure de la plupart des paramètres optiques

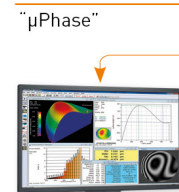
FTM, EFL, BFL, centrage, alignement front d'onde

Applications en R&D et production



Banc de FTM
UV, VIS, IR

Interféromètre "μPhase"



Station de centrage optique

TRIOPTICS France

76 rue d'Alsace
69100 Villeurbanne
Tel. +33 (0)4 72 44 02 03
www.trioptics.fr

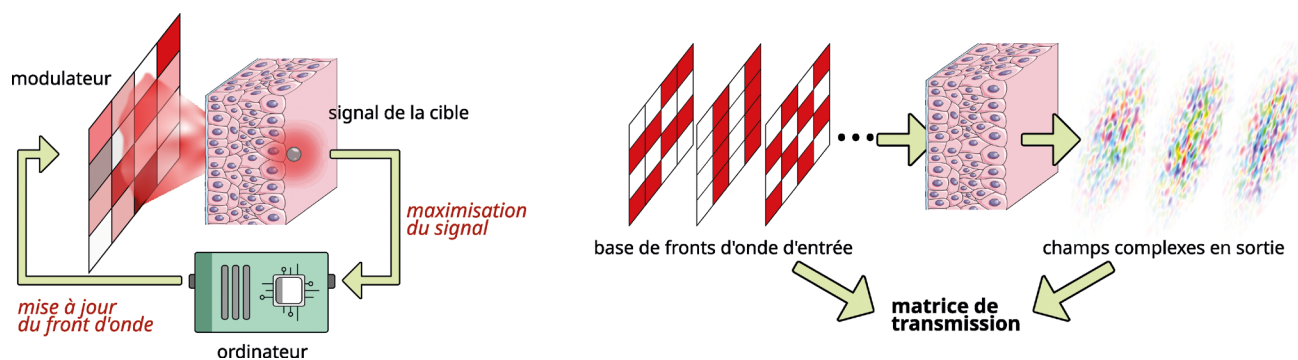


Figure 4. Approches de contrôle du front d'onde. Gauche, optimisation séquentielle en boucle fermée. Le front d'onde est façonné de manière à maximiser un signal mesuré en provenance d'une cible située dans, ou de l'autre côté, d'un milieu complexe. Droite, mesure de la matrice de transmission (MT). En envoyant une séquence correspondant à une base d'illumination et en mesurant les champs complexes transmis correspondants, on reconstruit la MT.

la Matrice de Transmission (MT) [8]. Alors, plutôt que d'adapter séquentiellement l'entrée à une propriété souhaitée, on mesure la MT pour ensuite l'utiliser pour réaliser une opération donnée. Typiquement, on envoie une série de masques sur le SLM, formant une base d'illumination, et on mesure pour chacun le champ complexe en sortie, chaque mesure constituant une colonne de la MT (voir figure 4, droite). Une fois mesurée, elle permet de contrôler la propagation de la lumière et ainsi de trouver le champ incident pour, par exemple, focaliser en n'importe quel point à la sortie, ou maximiser le transport d'énergie. De même, on peut mesurer la matrice de réflexion, qui lie le champ incident au champ réfléchi, et ainsi donne des informations sur le milieu ou sur un objet dissimulé, sans accès à l'autre côté. Cependant, outre la nécessité d'accéder au champ optique, la mesure de la MT présente certaines limites. La stabilité du système est essentielle : si le milieu évolue après ou pendant la caractérisation, la MT devient inutilisable. De plus, la modélisation par matrice se restreint aux milieux linéaires, bien que des travaux existent pour étendre le principe aux non-linéarités.

PERSPECTIVES ET APPLICATIONS

La possibilité de moduler, avec un grand nombre de degrés de liberté, le champ incident dans les milieux complexes pour optimiser un signal ou mesurer une matrice de transmission/réflexion a ouvert la voie à de nombreuses applications nouvelles. La connaissance de la MT d'un milieu permet de synthétiser

des fronts d'onde arbitraires en sortie, qu'il s'agisse de focaliser l'énergie ou de créer des motifs structurés, permettant d'utiliser un milieu complexe comme un élément optique classique [8]. Un milieu complexe peut alors être employé comme une lentille, avec des applications en micromanipulation optique, ainsi que comme une lame de phase ou comme un filtre spectral. Ces méthodes facilitent également la reconstruction d'images à travers des fibres multimodes et des tissus biologiques, ouvrant des perspectives pour l'imagerie endoscopique à haute résolution et la microscopie non invasive [1,2]. En télécommunications fibrées, l'analyse de la matrice de transmission

constitue une approche pour caractériser et optimiser des canaux de propagation offrant une capacité accrue ou une meilleure stabilité face aux perturbations. Enfin, l'exploitation des milieux complexes comme circuits photoniques réalisant des projections aléatoires a permis de débloquent des applications en traitement du signal et en calcul analogique, notamment pour l'apprentissage profond [2]. Il reste cependant des défis importants pour la mise en œuvre de la plupart de ces applications à l'échelle industrielle, notamment la possibilité de mitiger l'effet des fluctuations des systèmes réels ainsi que d'intégrer ces techniques dans des dispositifs compacts et stables. ●

RÉFÉRENCES

- [1] S. Rotter and S. Gigan, *Rev. Mod. Phys.* **89**, 015005 (2017)
- [2] S. Gigan, *Nat. Phys.* **18**, 980 (2022)
- [3] C. Rosales-Guzmán and A. Forbes, *How to Shape Light with Spatial Light Modulators* (SPIE PRESS, 2017)
- [4] S. M. Popoff, R. Gutiérrez-Cuevas, Y. Bromberg, and M. W. Matthès, *J. Phys. Photonics* **6**, 043001 (2024)
- [5] J. C. A. Rocha, T. Wright, U. G. Butaite, J. Carpenter, G. S. D. Gordon, and D. B. Phillips, *Optics Express* **32**, 43300 (2024)
- [6] R. Gutiérrez-Cuevas and S. M. Popoff, *J. Phys. Photonics* **6**, 045022 (2024).
- [7] I. M. Vellekoop and A. P. Mosk, *Opt. Lett.* **32**, 2309 (2007).
- [8] S. M. Popoff, G. Leroose, R. Carminati, M. Fink, A. C. Boccara, and S. Gigan, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 100601 (2010).