

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Etude des optiques à gradient d'indice complexe compatible avec une fabrication par structuration laser

Référence : **PHY-DOTA-2026-15**

(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : Octobre 2026 à Janvier 2027
selon le type de financement

Date limite de candidature : 01/06/2026

Mots clés :

Optique à gradient d'indice, freeform, diffractif, structuration laser, conception optique, tracé de rayons différentiables

Profil et compétences recherchées :

Formation en optique, matériaux ou mathématique appliquée

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif :

Le domaine de l'imagerie a amorcé une révolution, dans un premier temps dans le visible, grâce à la réduction de la taille des pixels qui a permis de répondre efficacement à la problématique SWAP-C (size Weight Power and Cost). Cette révolution a permis une forte diffusion de l'imagerie dans la société avec l'émergence de nouvelles applications. Le domaine de l'infrarouge suit également cette même tendance. Maintenant le point dur porte sur la partie optique qui est régie par ses caractéristiques d'ordre 1 (longueur focale, ouverture) et par la physique de la diffraction qui limite la résolution optique du système. Avec des pixels plus petits, l'optique doit être plus ouverte pour réduire la tache de diffraction. Cette contrainte forte fait qu'une simple adaptation d'un système optique ancien n'est pas possible et de nouvelles stratégies doivent être imaginées pour continuer à répondre à la problématique SWAP-C. Une première stratégie a consisté à complexifier les surfaces optiques (asphériques, freeform) afin d'augmenter le nombre de degrés de liberté sans augmenter le nombre de surfaces dans le système optique. La seconde stratégie consiste à s'inspirer de la nature en utilisant des optiques à gradient d'indice (appelées lentilles GRIN pour gradient index) c'est-à-dire des optiques dont l'indice varie dans le volume. La réalisation des GRINs étant plus complexe que la gravure et le polissage de surface, la solution GRIN a été jusqu'à présent délaissée au profit des surfaces complexes. L'émergence récente de nouvelles technologies de fabrication d'optiques GRIN (impression 3D, structuration laser, empilement de nano-couches de polymères...) remet sur le devant de la scène les optiques GRIN. Ces technologies permettent d'envisager des GRINs complexes (freeform, discontinues...). De plus la combinaison des surfaces complexes avec des GRINs complexes (CGRIN) est tout à fait envisageable pour réaliser des systèmes SWAP très ouverts et compatibles avec de très petits pixels. Cependant comme tout domaine émergent, de nombreuses difficultés doivent être résolues comme la problématique d'optimisation de systèmes comprenant de nombreux degrés de liberté, leur fabrication et leur métrologie.

L'objectif de la thèse est d'étudier le potentiel des optiques GRIN complexes (CGRIN) réalisables par structuration de la matière avec un laser femto seconde pour répondre aux problématiques SWAP. Ces travaux amèneront le la doctorant.e à adresser les difficultés de conception, de fabrication et de métrologie pour les optiques CGRIN.

L'ONERA travaille avec l'ICMMO (Institut de Chimie moléculaire et des matériaux d'Orsay, Université Paris-Saclay) dans le cadre de thèses et de projets sur la problématique de la structuration de fonctions optiques dans la matière avec un laser femtoseconde. L'ICMMO dispose d'un laser femtoseconde capable de structurer une lame dans son épaisseur pour créer des variations d'indice contrôlées permettant d'implémenter des gradients d'indice. De premières lentilles à gradient d'indice et lentilles de Fresnel à gradient d'indice ont été réalisées dans des lames à faces parallèles. Des abaques reliant les paramètres du laser aux variations de phase induites pour des verres d'oxyde lourds commerciaux ou des verres en chalcogénure ont été établies. Le verre Corning 9754 nous intéresse particulièrement car il a de très bonnes propriétés mécaniques, une fenêtre de transparence du visible au MWIR et permet d'obtenir des variations d'indice importantes par structuration laser. La thèse pourra se décliner selon les axes suivants :

- **Implémentation d'un modèle de gradient d'indice obtenu par laser femtoseconde dans des codes de conception optique.** Il s'agira en particulier d'étudier la variation chromatique selon la longueur d'onde de gradients d'indice obtenus par structuration laser à l'aide d'un ellipsomètre IR de Mueller (au synchrotron Soleil) et d'implémenter le modèle de variation d'indice et d'absorption en fonction de la longueur d'onde dans le logiciel commercial ANSYS ZEMAX OPTICSTUDIO. La correction du chromatisme avec un GRIN radial structuré par laser sera envisagée si la constringence du GRIN présente des propriétés intéressantes [1].

- **Evaluation de l'intérêt d'un banc de mesure pour contrôler la qualité de la structuration laser et valider les process de structuration de la matière.** Le moyen expérimental s-SNOM / nano-FTIR permet d'obtenir des cartographies nano-chimique d'un matériau. Il s'agira de mesurer l'amplitude et la phase du champ diffusé à la pointe pour avoir accès localement à la fonction diélectrique avec une résolution latérale d'environ 10–50 nm. Les homogénéités des structures pourront alors être sondées. L'origine des changements d'indice et de phase pourront aussi être observés et exploités afin d'améliorer le processus de structuration de la matière par un laser femtoseconde.
- **Réalisation de composants optiques obtenus par structuration laser.** Il s'agira d'établir des abaques de la variation d'indice/de phase mesurée dans le visible et dans le SWIR en fonction des propriétés du laser et de la profondeur de la structuration. Plusieurs fonctions optiques obtenus par empilement de couches seront envisagées (GRIN freeform [2], lentille de Fresnel d'ordre élevé [3]). L'impact de microstructures parasites sur la qualité image sera évalué. Cette étude adresse la problématique de la conception de systèmes optiques disposant de nombreux degrés de liberté. L'implémentation d'optiques GRIN dans le logiciel de tracé de rayons différentiables développé à l'ONERA (appelé FORMIDABLE) sera envisagée. La différentiabilité permet d'optimiser plus efficacement que les logiciels de conception optique du commerce des systèmes disposant de nombreux degrés de liberté [4].

Tout au long de ces différents axes d'étude, le la doctorante sera amené.e à concevoir et réaliser des composants optiques ayant diverses fonctionnalités (imagerie, déphasage,...). Ces composants seront intégrés dans des systèmes optiques dont les performances d'imagerie seront évaluées expérimentalement. Les profils à gradient d'indice réalisés par le la doctorant.e seront analysés soit par la méthode par résolution de l'équation de transport d'intensité à l'ICMMO et/ou par la méthode de mesure de front d'onde avec un analyseur de type Phasics à l'ONERA.

Cette thèse est l'opportunité de développer tout un panel de compétences (modélisation, optimisation optique, mise en œuvre d'un banc laser, métrologie, caractérisation des performances optiques...). Le la doctorant.e bénéficiera des compétences et des moyens expérimentaux disponibles dans les laboratoires du DOTA et de l'ICMMO ainsi que du cadre applicatif de plusieurs projets collaboratifs.

- [1] Boyd, A. M. (2025). Optical Design of Generalized Gradient-Index Lenses: for the optimization of size, mass and cost-critical optical systems. [Dissertation (TU Delft), Delft University of Technology].
- [2] Lippman, D. H., Kochan, N. S., Yang, T., Schmidt, G. R., Bentley, J. L., & Moore, D. T. (2021). Freeform gradient-index media: a new frontier in freeform optics. *Optics Express*, 29(22), 36997-37012.
- [3] Tatiana Grulois, Guillaume Druart, Nicolas Guérineau, Arnaud Crastes, Hervé Sauer, and Pierre Chavel, "Extra-thin infrared camera for low-cost surveillance applications," *Opt. Lett.* 39, 3169-3172 (2014)
- [4] Balasubramanian, M., Campbell, S. D., & Werner, D. H. (2020, July). Highly-efficient GRIN lens optimization through differential ray tracing. In 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting (pp. 1991-1992). IEEE.

Collaborations envisagées :

ICMMO (prof. Mathieu Lancry en co-direction de thèse)

Collaborations potentielles avec l'université de Rennes sur les verres chalcogénures et le laboratoire Femto-ST à Besançon sur la mise en forme des faisceaux laser.

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Optique et Techniques Associées

Lieu (centre ONERA) : Palaiseau

Contact : Florence de la Barrière

Tél. : 01 80 38 63 53

Email : florence.de_la_barriere@onera.fr

Directeur de thèse

Nom : Guillaume Druart

Laboratoire : ONERA

Tél. : 01 80 38 64 13

Email : guillaume.druart@onera.fr

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>