

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Co-conception optique/traitement de systèmes optiques freeforms : apport des logiciels de conception optique professionnels et des algorithmes de déconvolution avancés

End-to-end design of freeform lens using commercial optical design software and advanced deconvolution algorithms

Référence : **PHY-DOTA-2025-04**

(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : 01/10/2025

Date limite de candidature : 15/07/2025

Mots clés :

Conception optique, Optique freeform, Traitement d'images, Co-conception

Profil et compétences recherchées :

Master ou Diplôme d'ingénieur en optique ou en traitement d'image. Compétences recherchées : conception optique et/ou traitement des images, programmation (Matlab, Python).

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif :

La plupart des systèmes d'imagerie comprennent un système optique couplé à un détecteur et un traitement numérique de l'image. L'optique est généralement conçue en amont du traitement qui est développé a posteriori. Au contraire, la co-conception optique/traitement est une approche qui consiste à optimiser l'optique et le traitement dans un même temps, afin d'optimiser les performances globales du système pour une application donnée [Sto08, Dia10]. Cette approche permet par exemple de simplifier le système optique à performances fixées [Yan23] ou d'améliorer ses performances, comme la profondeur de champ, grâce à la prise en compte du traitement [Dia10]. Jusqu'à récemment, la plupart des systèmes étudiés se sont limités à des combinaisons optiques simples, à ouverture et champ modérés. Pour des applications de surveillance aéroportée, visible et/ou infrarouge, une très forte ouverture et un grand champ sont nécessaires, aboutissant à des combinaisons optiques très complexes mais qui doivent respecter des contraintes d'encombrement et de poids.

La co-conception d'optiques complexes peut s'adresser de deux manières : i) en utilisant un traceur de rayons différentiable [Hal21, Sun21], à l'instar de FORMIDABLE, logiciel sous licence ESCL qui a été développé à l'ONERA, qui peut être couplé avec du Deep Learning [Duf23], ou ii) en utilisant un logiciel de conception optique commercial comme Synopsys Code V ou Zemax OpticStudio [Sto08, Bur18, Fon22a]. Le logiciel Code V dispose d'un traceur de rayon performant et d'un algorithme d'optimisation sous contraintes dont la qualité est éprouvée et qui permet d'optimiser un système optique ex nihilo grâce aux compétences du concepteur opticien. Ils possèdent également des outils d'analyse et de tolérancement encore peu disponibles dans des nouveaux outils comme FORMIDABLE. Si la première approche par tracé de rayon différentiable a pour vocation d'être automatique, la seconde permet de préserver un environnement familier pour le concepteur opticien et son équipe. L'enjeu est alors de prendre en compte l'effet du traitement d'image durant le processus de conception, et donc de mettre en œuvre le principe de co-conception dans cet environnement préférentiel.

L'objectif de la thèse est d'explorer l'apport de la co-conception à des systèmes d'imagerie à forte ouverture et grand champ, comprenant un traitement de déconvolution, en utilisant le logiciel de conception optique Code V. Le critère d'optimisation du système d'imagerie sera la qualité de l'image déconvoluée. On s'appuiera sur des travaux menés au sein du groupe Imagerie et Information (LCF). Un premier critère approché de co-conception, basé sur la réponse optique seule, a été proposé et a permis de montrer la réduction du coût d'un système à très forte ouverture [Bur18]. Un second critère de co-conception, basé sur la qualité de l'image finale et prenant en compte le traitement de déconvolution de façon rigoureuse, a été implémenté sous Code V [Fon22a] permettant d'optimiser des combinaisons réalistes réfractives comme un Triplet de Cooke. L'apport d'algorithmes de déconvolution spatialement adaptatifs à optique fixée a été également étudié [Fon22b].

Les systèmes optiques étudiés pendant la thèse seront de type réfléchissant (à miroirs) pour une utilisation large bande spectrale (du visible à l'infrarouge), décentrés, compacts, à grande ouverture et grand champ. En particulier, on étudiera l'utilisation de surfaces freeforms qui permettent d'améliorer la compacité des systèmes d'imagerie tout en conservant voire en améliorant les performances d'imagerie. Les solutions

obtenues en co-conception pourront être comparées avec des solutions classiques à trois miroirs de type TMA (three-mirrors anastigmat) ou alpha-Z [Duv23] en termes de qualité image finale après déconvolution et de paramètres physiques tels que le nombre de miroirs, l'encombrement, la forme des surfaces et leur fabricabilité. On étudiera également l'apport de la co-conception à la possibilité d'étendre la bande spectrale du visible à l'infrarouge lointain (8-12 μ m) et de doter ainsi le système d'une capacité « multispectrale ».

La thèse se structurera autour des axes suivants :

- L'optimisation du critère rigoureux sous Code V. L'optimisation sous Code V du critère de co-conception dépend aujourd'hui fortement du point de départ. Il s'agira d'améliorer la capacité de la co-optimisation sous Code V à trouver des solutions globalement optimales ;
- L'étude de l'utilisation de composants freeform pour compenser différents types d'aberrations, en particulier de champ, et leur intégration optimale dans les combinaisons en tirant partie de la puissance du traitement numérique ;
- L'étude de la sensibilité d'un système co-conçu en faisant un tolérancement optique et un tolérancement du traitement d'image. Il s'agira également de prendre en compte le tolérancement, ou plutôt le co-tolérancement, dès la phase d'optimisation via des fonctions de mérite native du logiciel Code V. De nouvelles métriques dédiées au tolérancement de systèmes co-conçus pourront être implémentées ;
- La prise en compte de traitement spatialement adaptatifs dans le critère d'optimisation.

Si le temps le permet, les systèmes réfléchifs freeforms co-conçus implémentés sous Code V pourront être comparés avec ces mêmes systèmes modélisés à l'aide de surfaces NURBS (Non Uniform Rational B-Splines) sous FORMIDABLE. Il a en effet été montré que ce type de représentation de surface pouvait améliorer des systèmes freeform conventionnels [Fre24] et il reste à vérifier l'intérêt d'une telle démarche couplée à la co-conception.

Bibliographie :

[Bur18] M.-A. Burcklen, H. Sauer, F. Diaz, F. Goudail, "Joint digital-optical design of complex lenses using a surrogate image quality criterion adapted to commercial optical design software," *Appl. Opt.* 57, 9005-9015 (2018).

[Dia10] F. Diaz, F. Goudail, B. Loiseaux, J.-P. Huignard, "Comparison of depth of focus enhancing pupil masks based on a signal-to-noise ratio criterion after the deconvolution", *J. Opt. Soc. Am. A* 27, 2123-2131 (2010).

[Duf23] M. Dufraisse, P. Trouvé-Peloux, J.-B. Volatier, F. Champagnat, "Deblur or denoise: the role of an aperture in lens and neural network co-design", *Opt. Letters* 48, 2 (2023).

[Duv23] L. Duveau, "Freeform mirror designs for aerospace multi spectral band imaging systems", Thèse de Doctorat, Université Jean Monnet (2023).

[Fon22a] A. Fontbonne, H. Sauer, F. Goudail, "Comparison of end-to-end optimization methods of optics and image processing in professional optical system design software", *Opt. Express* 30(8), 13556-13571 (2022).

[Fon22b] A. Fontbonne, H. Sauer, F. Goudail, "Improved performance of a hybrid optical/digital imaging system with fast piecewise Wiener deconvolution", *Opt. Express* 30(19), 34343-34361 (2022).

[Fre24] Freslier, C.; Druart, G.; Fontbonne, A.; Lépine, T.; Buisset, C.; Agocs, T.; Heliere, A.; Keller, F.; Volatier, J.-B.; Beaussier, S.; et al. « Comparative Study on the Interest in Non-Uniform Rational B-Splines Representation versus Polynomial Surface Description in a Freeform Three-Mirror Anastigmat », *Photonics* 11, 875 (2024).

[Hal21] A. Halé, P. Trouvé-Peloux, J.-B. Volatier, "End-to-end sensor and neural network design using differential ray tracing," 29, *Optics- Express* (2021).

[Sto08] D. G. Stork et al., "Theoretical foundations for joint digital-optical analysis of electro-optical imaging systems," *Appl. Opt.* 47, B64 (2008).

[Sun21] Q. Sun, C. Wang, Q. Fu, X. Dun, W. Heidrich, "End-to-end complex lens design with differentiable ray tracing", *ACM Trans. Graphics*, 40 (2021).

[Yan23] T. Yang, H. Xu, D. Cheng, and Y. Wang, "Design of compact off-axis freeform imaging systems based on optical-digital joint optimization," *Opt. Express* 31, 19491-19509 (2023).

Collaborations envisagées :

Ces travaux seront co-encadrés par François Goudail et Marie-Anne Burcklen (Groupe Imagerie et Information, Laboratoire Charles Fabry, IOGS) et Alice Fontbonne à l'ONERA, DOTA. Contacts : francois.goudail@institutoptique.fr ; marie-anne.burcklen@institutoptique.fr ; alice.fontbonne@onera.fr

Laboratoire d'accueil à l'ONERA :

Département : Optique et Techniques Associées

Lieu (centre ONERA) : Palaiseau

Contact : Alice FontbonneTél. : 0180386365 Email : alice.fontbonne@onera.fr**Directeur de thèse :**

Nom : François GOUDAIL

Laboratoire : Laboratoire Charles Fabry

Tél. : 0164533195

Email : francois.goudail@institutoptique.frPour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>