

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Optimisation multi-objectifs et robuste de systèmes catoptriques freeform résilients

Référence : **PHY-DOTA-2025-03**
 (à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : 01/10/2025

Date limite de candidature : 15/07/2025

Mots clés :

Conception optique, Tolérancement, Optimisation, Quantification d'incertitudes

Profil et compétences recherchées :

Conception optique, Optimisation, Programmation (Python)

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif :

Concevoir des systèmes optiques performants et résilients est un défi pour les concepteurs opticiens. Les systèmes sont dits résilients quand ils sont tolérants à des erreurs de fabrication et d'alignement ou qu'ils maintiennent leur performance optique malgré des conditions environnementales extrêmes. Le plus souvent, une étude de tolérancement est nécessaire pour évaluer la résilience du système optique et est souvent lancée après l'obtention d'un système optique nominal. Si le système a peu de degrés de liberté (surfaces coniques), l'expérience du concepteur optique permet d'obtenir un système nominal qui sera résilient. Cependant, l'augmentation du nombre de degrés de liberté pour améliorer les performances des systèmes optiques remet en question l'expérience du concepteur opticien. De fait, l'ONERA s'intéresse depuis plusieurs années aux surfaces *freeform* [1] qui permettent de réduire le nombre de composants optiques et l'encombrement tout en maintenant ou améliorant les performances des systèmes optiques. Les surfaces *freeform* sont des surfaces qui n'ont pas de symétrie centrale et qui permettent d'augmenter considérablement le nombre de degrés de liberté. Cependant, de tels systèmes ont des figures de mérite (e.g., taille du *spot diagram*) qui présentent de nombreux minima locaux et il est difficile de converger vers le système qui combine performance et résilience. Il est donc nécessaire d'envisager l'évaluation conjointe des performances et de la résilience du système optique dès sa phase de conception. Plusieurs stratégies peuvent être mises en place dans les logiciels de conception commerciaux, mais ce sont souvent des modifications à la marge qui reposent toujours sur le même algorithme d'optimisation basé sur un optimiseur de type Levenberg-Marquardt. Il serait donc pertinent d'étudier d'autres stratégies d'optimisation.

La thèse a pour objectif de proposer des solutions à l'optimisation de surfaces *freeform* pour des systèmes catoptriques appliqués au domaine spatial, et de mettre en place des critères de décision dédiés aux différentes contraintes usuellement rencontrées : volume, tolérance de fabrication, caractère multispectral, etc. Ainsi, la thèse vise à développer des stratégies d'optimisation prenant en compte des injonctions contradictoires, conciliant performance optique avec compacité et résilience. Pour répondre à cet objectif, cette thèse se déroulera selon deux axes.

Le premier axe consiste à traiter le problème de conception de systèmes catoptriques selon un problème d'optimisation multi-objectif. L'optimisation multi-objectif est une branche de l'optimisation mathématique traitant spécifiquement de problèmes d'optimisation ayant plusieurs critères d'optimisation (souvent considérés comme antagonistes). Cette formulation du problème de conception permet de trouver des solutions fournissant des compromis optimaux (e.g., frontière de Pareto) entre différents objectifs comme l'encombrement, la distorsion, etc. Certains algorithmes et méthodes ont déjà été appliqués à l'optimisation de systèmes optiques variés. Pour l'application envisagée, il s'agira par exemple de mettre en regard deux critères antagonistes tels que la qualité de l'image obtenue et le volume du système optique. Le cas des télescopes à miroirs *freeform* présente plusieurs difficultés spécifiques qui seront à étudier et surmonter, notamment car les surfaces *freeform* modifient grandement la dimensionnalité du problème d'optimisation (quelques centaines de degrés de liberté, contre les quelques dizaines dans les systèmes optiques plus conventionnels). A l'aide de méthodes d'analyse de sensibilité (e.g., indices de Sobol' [2], indices HSIC [3]), il s'agira donc dans un premier temps de déterminer l'impact de la représentation de surface *freeform* (Zernike, Polynômes XY, *Non Uniform Rational B-splines* (NURBS) [4], ...) sur la (ou les) critère(s) d'optimisation. Cela permettra par la suite de faire un choix éclairé sur l'utilisation d'un algorithme d'optimisation. Aujourd'hui, les algorithmes métaheuristiques (évolutionnaires CMA-ES, ou essais de particules) sont adaptés pour une large palette de problèmes liés à l'optique. Leurs utilisations et études sont cependant limitées avec les logiciels de conception optiques du commerce tels que Synopsys CodeV ou

Zemax OpticStudio. Pour pallier ce problème, il est proposé d'utiliser le traceur de rayons différentiable FORMIDABLE [5] développé à l'ONERA, qui permet également la représentation de surfaces de diverses optiques *freeform*, y compris les surfaces décrites localement par des NURBS. Ce logiciel, sous licence ESA, bénéficie de deux avantages. D'une part, il est interfaçable avec le langage de programmation Python, ce qui signifie que des bibliothèques tiers telle que la bibliothèque OpenTURNS [6] peuvent fonctionner avec. D'autre part, on peut connaître aisément les dérivées partielles des rayons tracés en fonction des variables d'optimisation, ce qui peut être un avantage déterminant pour les algorithmes d'optimisation multi-objectifs. Le premier objectif de la thèse consiste donc à mener une étude d'analyse de sensibilité sur le système puis réaliser des optimisations multi-objectifs de systèmes optiques *freeform* et de déterminer une méthodologie pour réaliser des choix adaptés sur les systèmes optiques optimisés. Une attention particulière sera apportée aux surfaces décrites par des NURBS, peu utilisées dans les logiciels de conception optique commerciaux mais bien supportées par FORMIDABLE. Nous avons montré lors d'une précédente thèse que l'utilisation de ce type de surfaces permet d'améliorer considérablement les performances des systèmes catoptriques *freeform* et d'envisager des combinaisons multispectrales [7].

Le deuxième axe de la thèse sera dédié à l'amélioration de la robustesse des systèmes conçus aux défauts de fabrication, via des stratégies d'optimisation dédiés à cette problématique. Usuellement, l'étape de tolérancement se fait après l'optimisation du système, via une analyse Monte-Carlo, sur les tilts, les décentrement ou les défauts de fabrication. Ce processus peut être fastidieux pour le concepteur opticien, car un système trop sensible peut l'obliger à reprendre intégralement le concept optique. Le second objectif de la thèse sera donc d'intégrer le tolérancement dans FORMIDABLE dès l'optimisation du système afin de converger plus rapidement vers des solutions résilientes, aux côtés de nouvelles méthodes d'optimisation robuste utilisant les gradients. Ces méthodes d'optimisation robuste devront prendre en compte la haute dimensionnalité des surfaces *freeform*, dont le tolérancement est spécifique, d'autant plus que l'impact de certaines portions de surface peut être prépondérant par rapport à d'autres. Ces surfaces peuvent également servir à désensibiliser le système aux erreurs de positionnement, ce qui s'avère prometteur dans le cas d'une optimisation robuste. Il s'agira donc dans ce deuxième axe d'identifier les sources d'incertitudes, de proposer une modélisation cohérente (distribution de probabilité) avec la physique des phénomènes. En fonction de la dimensionnalité du problème, des analyses de sensibilité pourront être menées de manière à identifier les sources d'incertitudes les plus influentes [6]. A partir de la caractérisation de ces incertitudes, une formulation adéquate du problème d'optimisation sera proposée, ainsi que des algorithmes de propagation d'incertitudes et d'optimisation adaptés [8].

Le déroulé envisagé de la thèse est le suivant :

1. Bibliographie et tests des méthodes d'optimisation multi-objectifs et sous incertitudes ;
2. Mise en place d'une stratégie d'optimisation multi-objectifs pour la conception de systèmes optiques ;
3. Application aux systèmes optiques *freeform* ;
4. Caractérisation des incertitudes de tolérancement intervenant dans le processus de conception de systèmes optiques et analyses de sensibilité ;
5. Proposition d'une méthode d'optimisation robuste adaptée aux systèmes optiques et application aux systèmes *freeform*.

A l'issue de cette thèse, une méthodologie et une stratégie d'optimisation de système optiques catoptriques *freeform* permettant un choix éclairé sur les solutions à retenir, auront été proposées. Le doctorant-e bénéficiera des compétences du DOTA (Département en Optique Techniques associées de l'ONERA) et en ce qui concerne les problématiques optiques et des compétences du DTIS (Département de Traitement de l'Information et Systèmes) en ce qui concerne les problématiques algorithmiques.

1. J. P. Rolland, M. A. Davies, T. J. Suleski, C. Evans, A. Bauer, J. C. Lambropoulos, and K. Falaggis, "Freeform optics for imaging," *Optica* **8**(2), 161 (2021).
2. I. M. Sobol, "Sensitivity Estimates for NonLinear Mathematical Models," in (1993).
3. S. Da Veiga, "Global sensitivity analysis with dependence measures," *J. Stat. Comput. Simul.* **85**(7), 1283–1305 (2015).
4. M. P. Chrisp, "New freeform NURBS imaging design code," in M. Figueiro, S. Lerner, J. Muschaweck, and J. Rogers, eds. (2014), p. 92930N.
5. J.-B. Volatier, S. J. Beaussier, G. Druart, P. Jougla, and F. Keller, "Implementation of FORMIDABLE: A generalized differential optical design library with NURBS capabilities," *J. Eur. Opt. Soc.-Rapid Publ.* **20**(1), 2 (2024).
6. M. Baudin, A. Dutfoy, B. Iooss, and A.-L. Popelin, "Open TURNS: An industrial software for uncertainty quantification in simulation," (2015).
7. C. Freslier, G. Druart, A. Fontbonne, T. Lépine, C. Buisset, T. Agocs, A. Heliere, F. Keller, J.-B. Volatier, S. Beaussier, and P. Jougla, "Comparative Study on the Interest in Non-Uniform Rational B-Splines Representation versus Polynomial Surface Description in a Freeform Three-Mirror Anastigmat," *Photonics* **11**(9), 875 (2024).

8. L. Brevault, M. Balesdent, and J. Morio, *Aerospace System Analysis and Optimization in Uncertainty*, Springer Optimization and Its Applications (Springer International Publishing, 2020).

Collaborations envisagées :

Laboratoire d'accueil à l'ONERA :

Département : Optique et Techniques Associées

Lieu (centre ONERA) : Palaiseau

Contact :

Tél. : 01 80 38 64 13 Email : guillaume.druart@onera.fr

Directeur de thèse :

Nom : Guillaume DRUART

Laboratoire : ONERA, DOTA

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>