

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Etude de l'apport de descriptions locales de surface dans l'optimisation de systèmes catoptriques hors axe via un traceur de rayons différentiable

Référence : **PHY-DOTA-2026-16**

(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 :

Système catoptrique, freeform, NURBS, conception optique, tracé de rayons différentiables

Profil et compétences recherchées :

Formation en optique ou mathématiques appliquées

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif :

Les systèmes catoptriques offrent des avantages significatifs dans la conception d'instruments innovants par rapport aux systèmes dioptriques : ils présentent un poids nettement inférieur pour de grandes longueurs focales, leur spectre de transmission extrêmement large ouvre des perspectives inédites pour l'imagerie multi-spectrale, et dans le contexte actuel, ils offrent également la possibilité de se passer de matériaux stratégiques tels que le germanium, garantissant ainsi une autonomie accrue dans leur développement. Cependant, utiliser une combinaison de miroirs alignés selon un même axe optique entraîne une obturation centrale qui dégrade la qualité image et la sensibilité du système optique. Des systèmes à miroirs décentrés sont proposés, mais cette nouvelle disposition entraîne l'apparition d'aberrations de décentrement qui sont difficilement compensables avec des surfaces asphériques. Aujourd'hui, les surfaces libres sans axe de symétrie appelées surfaces *freeform* ont permis de considérablement améliorer les performances des systèmes catoptriques décentrés tout en répondant à la problématique SWAP (Size Weight and Power). Répondre à la problématique SWAP est particulièrement important pour les applications spatiales où le volume et la masse des charges optiques dans les satellites sont très limitées.

Les surfaces complexes sont le plus souvent décrites par des bases polynomiales dans les logiciels de conception optique. Elles ont l'avantage de pouvoir décrire ces surfaces en limitant le nombre de degrés de liberté. Cependant, une modification d'un coefficient d'un monôme entraîne une modification de l'ensemble de la surface. On constate ainsi une stagnation de la performance optique lorsqu'on augmente l'ordre du polynôme. De plus, les bases polynomiales proposées ne sont pas toujours les mieux adaptées dans certains problèmes optiques spécifiques. L'idée est donc d'envisager plutôt une description locale des surfaces, ce qui est couramment utilisé dans les logiciels mécaniques mais est encore peu utilisée dans les logiciels de conception optique. Elle augmente en effet considérablement le nombre de degrés de liberté mais les logiciels de conception optique du commerce ne sont pas adaptés pour traiter des problèmes avec autant de degrés de liberté. Récemment, une équipe de chercheur américain ont proposé un code pour optimiser des surfaces décrites localement par des Non-Uniform Rational B-Splines (NURBS) appelé FANO (Fast Accurate NURBS Optimization) [1-2]. Ce code dispose d'un tracé de rayons parallélisable qui permet de tracer très rapidement un nombre de rayons bien supérieur au logiciel d'illumination FRED. Cette équipe a montré que les systèmes optimisés avec des surfaces décrites par des NURBS avaient de très bonnes performances optiques et étaient robustes aux problèmes mécaniques et thermiques [3]. Un système à miroir avec un très grand champ de vue a été optimisé de cette manière [4]. L'ONERA a de son côté développé un traceur de rayons différentiable appelé FORMIDABLE [5]. L'aspect différentiable permet une meilleure optimisation de systèmes possédant de nombreux degrés de liberté [6], dont les systèmes décrits par des NURBS. Nous avons montré un gain significatif en qualité image pour un système catoptrique hors axe [7].

L'objectif de la thèse est d'évaluer le potentiel des surfaces décrites localement par des NURBS par rapport à leurs versions décrites par des bases polynomiales sur des systèmes catoptriques hors axe. Il s'agira :

- De montrer un gain notable en qualité image sur toute une gamme de concepts catoptriques hors axe conçus à l'ONERA par rapport à leurs versions décrites par des polynômes. L'impact de l'échantillonnage de la surface d'un miroir rectangulaire par des NURBS sera étudié. Une adaptation des descriptions locales des surfaces à des surfaces circulaires sera proposée. Enfin, différentes stratégies d'optimisation efficaces de ces surfaces seront étudiées ;
- De montrer un gain notable dans la qualité de la conjugaison pupillaire des systèmes réimageurs. Le code FORMIDABLE sera amélioré pour contraindre la conjugaison pupillaire ;
- De montrer leur intérêt pour des systèmes dont certaines optiques ont une forte anamorphose comme le système TROPOMI [8] ;

- De développer une stratégie de tolérancement de surfaces décrites par des NURBS, en proposant notamment des erreurs de forme réalistes par rapport aux erreurs de fabrication ;
- Si le temps le permet : de coupler une méthode de construction directe de surface (par exemple la méthode SMS réimplémentée à l'ONERA [9]) avec le logiciel d'optimisation FORMIDABLE. En effet les méthodes de construction directes de surface construisent point par point des surfaces qui seront plus facilement décrites par des NURBS que par une base polynomiale. Cette démarche permettra de mettre au point une approche d'optimisation globale.

L'expérience acquise sur les NURBS permettra de concevoir une charge optique compacte multispectrale pour des applications aéroportées visant au NADIR. Le-la doctorant-e bénéficiera des compétences et des moyens expérimentaux disponibles dans les laboratoires du DOTA ainsi que de l'environnement associatif FO-RS pour sensibiliser les travaux de thèses devant plusieurs industriels et discuter des problématiques de fabricabilité des miroirs. Le-la doctorant-e pourra s'appuyer sur de premières réalisations de l'ONERA de systèmes catoptriques hors axe afin de mener à bien ses travaux (architectures optiques, métrologie des miroirs et caractérisations).

- [1] Michael P. Chrisp, Brian Primeau, Michael A. Echter, "Imaging freeform optical systems designed with NURBS surfaces," Opt. Eng. 55(7) 071208 (1 August 2016).
- [2] Chrisp, M. P. (2014, June). New freeform NURBS imaging design code. In International Optical Design Conference (pp. ITh3A-7). Optica Publishing Group.
- [3] Derek Kopon, Jenna Montague, Brian Primeau, Plamen Krastev, Gregory Cappiello, James Johnson, "Sensitivity comparison of a NURBS freeform telescope," Proc. SPIE 12669, Optomechanical Engineering 2023, 126690C (28 September 2023).
- [4] James B. Johnson, Christopher D. Roll, Amanda Fontaine, Todd G. Ulmer, Jeffrey M. Roth, "Wide field-of-view NURBS-based freeform afocal telescope," Proc. SPIE 12530, Advanced Optics for Imaging Applications: UV through LWIR VIII, 1253009 (14 June 2023).
- [5] Volatier, J. B., Beaussier, S. J., Druart, G., Jougla, P., & Keller, F. (2024). Implementation of FORMIDABLE: A generalized differential optical design library with NURBS capabilities. Journal of the European Optical Society-Rapid Publications, 20(1), 2.
- [6] Jean-Baptiste Volatier, Álvaro Menduiña-Fernández, and Markus Erhard, "Generalization of differential ray tracing by automatic differentiation of computational graphs," J. Opt. Soc. Am. A 34, 1146-1151 (2017).
- [7] Freslier, C., Druart, G., Fontbonne, A., Lépine, T., Buisset, C., Agocs, T., ... & Jougla, P. (2024, September). Comparative Study on the Interest in Non-Uniform Rational B-Splines Representation versus Polynomial Surface Description in a Freeform Three-Mirror Anastigmat. In Photonics (Vol. 11, No. 9, p. 875). MDPI.
- [8] David Nijkerk, Bart van Venrooy, Peter Van Doorn, Rens Henselmans, Folkert Draaisma, André Hoogstrate, "The TROPOMI Telescope," Proc. SPIE 10564, International Conference on Space Optics — ICSO 2012, 105640Z (20 November 2017).
- [9] Mayeur, T., Volatier, J. B., Druart, G., Cau, F., Tartas, E., & Durand, A. (2023). Automatic method of exploring the landscape of freeform dioptric optical problems, working in the infrared region. Optics, 4(3), 482-499.

Collaborations envisagées :

Présentation des travaux et échanges dans le cadre de l'association FO-RS

Laboratoire d'accueil à l'ONERA :

Département : Optique et Techniques Associées

Lieu (centre ONERA) : Palaiseau

Contact : Alice Fontbonne

Tél. : 01 80 38 63 65 Email : alice.fontbonne@onera.fr

Directeur de thèse :

Nom : DRUART Guillaume

Laboratoire : 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>