HAL
open science

Optiques freeforms : défis et perspectives

Roland Geyl, François Houbre, Yan Cornil, Thierry Lepine, Yvan R. P. Sortais

To cite this version:

Roland Geyl, François Houbre, Yan Cornil, Thierry Lepine, Yvan R. P. Sortais. Optiques freeforms : défis et perspectives. Photoniques, 2021, 106, pp.17-21. 10.1051/photon/202110617 . hal-03170058

HAL Id: hal-03170058

https://hal.science/hal-03170058v1

Submitted on 15 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Optiques freeforms : **défis et perspectives**

Les optiques freeforms sont les optiques de demain. Elles inondent déjà notre quotidien dans de nombreux domaines et répondent à une attente profonde du marché. La révolution des optiques freeforms est en marche, une opportunité pour qui saura concevoir ces objets, les fabriquer, les mesurer et les intégrer.

https://doi.org/10.1051/photon/202110617

Roland GEYL[1,6], François HOUBRE[2,6], Yan CORNIL[3,6], Thierry LEPINE[4,6], Yvan SORTAIS[5,6,*]
[1] Safran Reosc – 91280 Saint-Pierre-du-Perray, France
[2] Savimex SAS – 06130 Grasse, France
[3] Light Tec – 83400 Hyères, France
[4] Université Paris-Saclay, Institut d'Optique Graduate School, CNRS, Laboratoire Hubert Curien – 42000 Saint-Etienne, France
[5] Université Paris-Saclay, Institut d'Optique Graduate School, CNRS, Laboratoire Charles Fabry – 91127 Palaiseau, France
[6] Association Freeform Optics – Recherche & Solutions – 91127 Palaiseau, France
***yvan.sortais@institutoptique.fr**

Les freeforms, qu'est-ce que c'est ?

La fabrication traditionnelle de surfaces optiques se fait par rodage mutuel de la pièce optique que l'on souhaite réaliser avec un outil et des abrasifs de plus en plus fins. Cette méthode converge vers la sphère et les artisans opticiens ont su maîtriser cet art jusqu'à des précisions nanométriques. Puis, par perturbation du procédé, des surfaces asphériques de révolution ont pu être produites. Enfin on extrait parfois des segments hors axe après polissage de la pièce mère.

Mais le besoin en degrés de liberté pour gagner en performance demeure insuffisamment satisfait. Une surface asphérique hors-axe garde la trace de la surface optique mère dont elle a été extraite par une relation entre les diverses composantes de son profil. Si on se limite aux aberrations du 3e ordre le segment off-axis que l'on extraira présentera des déformations en asphère, coma et astigmatisme, mais qui resteront liées entre elles (Fig. 1). Passer aux freeforms c'est se libérer de cette contrainte, laisser varier librement et indépendamment ces diverses composantes et définir un profil radial et des variations angulaires arbitraires.

Les pionniers des optiques freeforms

Le plus célèbre pionnier des freeforms est incontestablement Bernard Maitenaz qui inventa le verre VARILUX en 1953 avec la technologie de réalisation de ces verres à l'échelle industrielle. Aujourd'hui ESSILOR en est à sa 7e génération de verres et est un groupe de plus de 67 000 personnes générant plus de 7,5 Md€ de CA. En 1967, Luis Alvarez inventa un dispositif astucieux de deux lentilles à profil cubique qui, par translation relative, génèrent une focalisation variable. En 1972, la société Polaroid mit sur le marché son fameux SX70, un appareil photo à développement instantané dont le design optique replié comprenait deux composants optiques freeforms.

FO-RS est une association créée en 2019 à but de recherche collaborative entre acteurs industriels et académiques. Pour toute demande de renseignements s'adresser à son président actuel, Roland Geyl (roland.geyl@safrangroup.com).

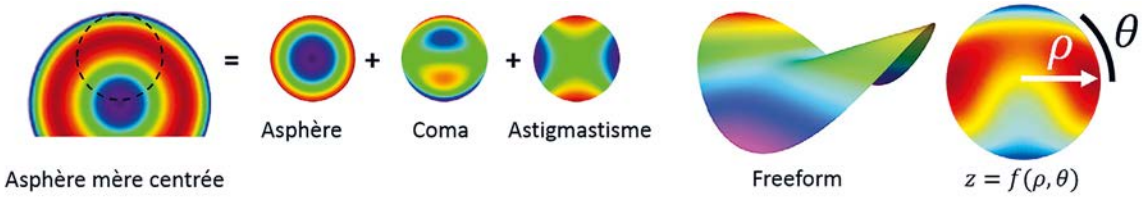


Figure 1. À gauche : les composantes d'une asphère hors-axe. À droite : liberté totale des freeforms.

Une révolution en conception optique

Avec les freeforms les instruments de précision peuvent gagner en compacité, en performance … ou bien sur les deux aspects. Mais optimiser avec plus de degrés de liberté devient plus complexe. Le temps est révolu où, afin de calculer les optiques de ses zooms, Pierre Angénieux faisait calculer la propagation de rayons par son équipe de comptables, à la règle à calcul… La puissance des ordinateurs augmentant, on est passé des cartes perforées, à des logiciels faisant tourner des algorithmes très complexes sur des machines ultra-rapides : de quelques minutes pour calculer la propagation d'un rayon en 1944, on est passé à plusieurs millions de rayons par seconde aujourd'hui. Mais tout ne se résume pas à un problème de puissance de calcul. Les méthodes de calcul elles-mêmes évoluent, selon les applications envisagées (médicale, automobile, affichage, imagerie, éclairage), et conduisent à une panoplie de logiciels, « petits » (mais résolvant des cas particuliers) ou « gros » (CodeV, LightTools et LucidShape de Synopsys, OpticStudio de Zemax, SPEOS de Ansys), intégrant des améliorations régulièrement.

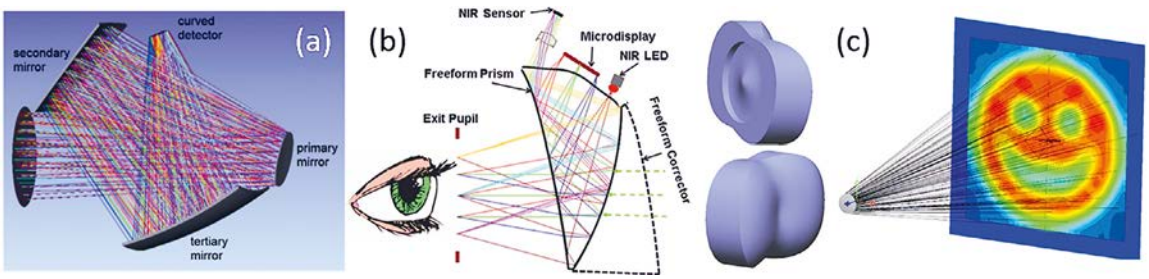
Historiquement, ce sont les applications d'imagerie qui ont permis aux méthodes de calcul d'évoluer, en optimisant des formes décrites par des solutions analytiques (coniques, polynômes) de plus en plus complexes. Tous les logiciels maîtrisent maintenant bien ces techniques avec différents moteurs : méthodes de moindres carrés, optimisations locales ou globales. Les résultats et les fonctions de mérite (spot diagrammes, MTF…) sont présentés à l'utilisateur de plusieurs façons permettant d'appréhender le comportement de la solution retenue.

Parmi celles-ci, les aberrations nodales, qui permettent de mieux décrire les optiques inclinées, décentrées et, de façon générale les surfaces freeforms ; et d'augmenter considérablement les performances des systèmes optiques tout en les miniaturisant : objectifs des téléphones portables, télescopes à 3 ou 4 miroirs des nouveaux micro-satellites (CubeSat, Fig. 2a), etc. Ces mêmes logiciels permettent aussi de concevoir des combinaisons plus complexes : afficheurs tête haute (HUD), systèmes de réalité augmentée (Fig. 2b), etc.

Les applications d'éclairage, quant à elles, posent des défis logiciels différents, mélangeant l'utilisation de sources étendues avec des besoins de distribution de lumière uniforme ou non, et des contraintes sur la luminance (éclairage de rue) ou l'intensité (phare de voiture), sur la dispersion chromatique (éclairage médical) ou sur le rendement énergétique. Chacun de ces problèmes a été résolu par des méthodes de calcul différentes selon la complexité des surfaces (telles les optiques « Macro Focal » des phares automobiles), et des distributions lumineuses. Les récentes techniques de « tayloring » permettent de calculer des freeforms produisant des distributions d'éclairement arbitrairement complexes (projection de logos, Fig. 2c).

Aujourd'hui, les capacités de calcul des ordinateurs permettent d'envisager des logiciels calculant des optiques freeforms de plus en plus efficaces, intégrant de nouvelles techniques d'optimisation basées sur des algorithmes génétiques ou sur l'Intelligence Artificielle. Associées aux technologies émergentes comme les méta-lentilles, très complexes à calculer, ces nouvelles techniques de calcul pourraient révolutionner les optiques du futur.

Figure 2.
Conceptions freeforms : (a) un télescope replié (crédit : CNRS, Laboratoire d'Astrophysique de Marseille), (b) un prisme de réalité augmentée (crédit : University of Arizona), (c) une lentille permettant la projection d'un logo de forme arbitraire (crédit : Light Tec).



Les progrès des techniques de fabrication : la seconde révolution

Si les freeforms ont pu arriver dans notre quotidien, c'est aussi grâce aux progrès accomplis dans les techniques de fabrication optique, et notamment grâce à des contrôles numériques de plus en plus sophistiqués et précis. L'usinage diamant est la technologie de choix pour la réalisation de surfaces freeforms de précision (Fig. 3a). Né au début des années 1980, il a fait un bond au début des années 2000 avec l'essor des moteurs linéaires et les capacités de pilotage numérique des axes des machines, permettant de générer des formes non axisymétriques durant la rotation de la pièce. Ces progrès ont également bénéficié aux techniques de polissage des verres ophtalmiques (Fig. 3b). Autre avantage de l'usinage diamant : le référencement mécanique est connu avec la même précision que celle de l'usinage.

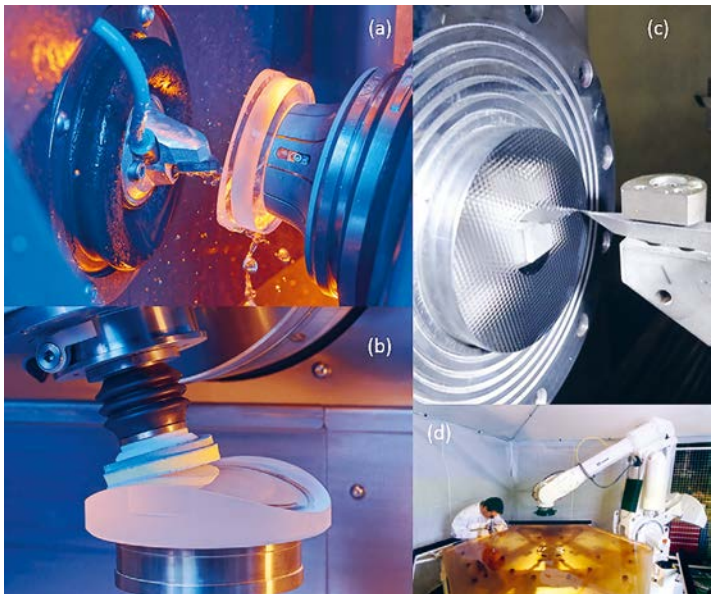


Figure 3.
Deux techniques de fabrication : l'usinage diamant est la technique de choix pour la production de pièces en grande série. Il permet de générer (a) des préformes polymères ophtalmiques qui seront ensuite polies (b) (crédit : Satisloh, filiale d'Essilor), ou bien (c) des moules métalliques qui serviront à répliquer des freeforms par injection de polymères (crédit : Gaggione) ; le polissage robotisé (d) est quant à lui réservé aux petites séries pour les applications de pointe (crédit : Safran Reosc).

Couplées à l'usinage diamant, les technologies de réplication par moulage et injection plastique rendent les freeforms accessibles au plus grand nombre (Fig. 3c). Les systèmes d'éclairage à LED, les lunettes de réalité virtuelle, les phares de nos voitures sont tous équipés d'optiques freeforms polymères. Le moulage par injection associe des processus complexes de mécanique des fluides et des changements de phase de la matière (plastification, solidification). Une communauté d'experts a progressivement acquis l'expérience qui permet de maîtriser les phénomènes physiques de retreint, et d'accéder aujourd'hui à des niveaux de précision sub-micronique de façon répétable et à moindre coût.

ARDOP INDUSTRIE
VOTRE PARTENAIRE :
Photométrie
Radiométrie & Colorimétrie
Radiomètres UV-C
Désinfection
Contrôle de source UV (LED UV, Excimer & Mercure basse pression)
Polymérisation

Colorimètres & Vidéocolorimètres
Mesures de l'uniformité en couleur ou luminance de vos sources ou displays

Nouveau Spectroradiomètre IR
Technologie BiTec : détecteur à matrice InGaAs + diode InGaAs
Refroidissement thermoélectrique
Plage spectrale 950-2150nm

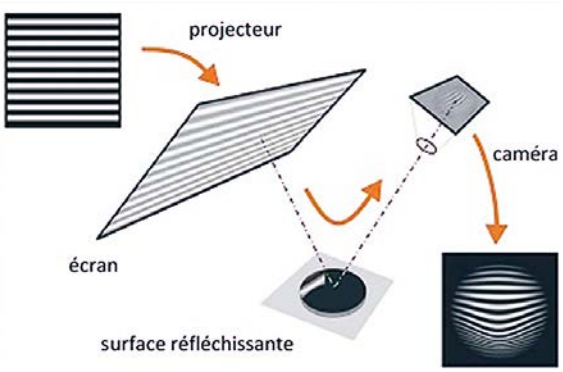
www.ardop.com
sales@ardop.cpm
+33 5 40 25 05 36

Le polissage robotisé, freeform dès son origine dans les années 90, est aujourd'hui un atout essentiel pour la réalisation de grandes optiques freeforms de haute précision (Fig. 3d). Le polissage magnéto-rhéologique, très industriel, a évolué également avec un contrôle numérique spécifique pour les surfaces freeforms. Enfin, l'impression 3D ouvre de nouvelles perspectives pour le prototypage ou les prescriptions ophtalmiques rares (ex : la société Luxexcel). Au niveau microscopique d'autres perspectives apparaissent encore avec la texturation de surface.

Problématiques de métrologie

Pour produire il faut mesurer. Et dans ce domaine il y a effervescence aussi. L'interférométrie assistée par un Computer Generated Hologram (CGH), qui transforme l'onde sphérique de référence en le négatif de la surface à tester, permet d'atteindre des précisions de mesure inférieures au nanomètre. Mais le CGH est coûteux, et les conditions opérationnelles rigoureuses. Sans CGH, il est possible de mesurer des freeforms par interférométrie mais il faut dans ce cas mesurer la pièce par morceaux, éventuellement sous différentes incidences, puis recombiner les mesures par *stitching*. Il existe quelques instruments au monde fonctionnant sur ce principe (voir QED Technologies ou l'institut ITO de l'Université de Stuttgart en Allemagne).
La mesure 3D par palpage, mécanique ou optique, est quant à elle universelle et ne nécessite aucun outillage. Mais l'optique exige mieux que les meilleures machines du monde de la mécanique. Certains fabricants ont poussé les limites de cette technique, en l'associant à la microscopie à force atomique (telle la machine UA3P de Panasonic) ou à l'interférométrie pour suivre les déplacements de la tête de mesure avec une précision inférieure à la longueur d'onde (tels les instruments Nanomephos de DUI, ou LuphoScan de Taylor Hobson), 50 nm typiquement.
Enfin, la technique de déflectométrie émerge avec sa simplicité, sa sensibilité et sa grande dynamique (Fig. 4).

Figure 4.
Principe de la déflectométrie – Des mires projetées par un écran LCD sont observées après réflexion sur la pièce dont le profil est ensuite déterminé par calcul à partir de leurs déformations.



Problématique de la représentation numérique des freeforms

La représentation mathématique des surfaces freeforms est un facteur déterminant de toute la chaîne des optiques freeforms. Leur modélisation numérique est source d'approximations en chaîne, avec des conséquences plus ou moins coûteuses en termes de dégradation des performances. Elle impacte tout d'abord les résultats des simulations au sein même des outils de conception optique. Puis, la traduction de ce modèle par les outils de conception mécanique et de commande d'usinage impacte la définition mécanique du composant et des outillages de fabrication. Et enfin, c'est par comparaison au modèle numérique que la qualité de chaque surface freeform est qualifiée puis mise sous contrôle pendant sa fabrication de série. L'enjeu principal consiste à garantir l'intégrité et la compatibilité de ce modèle tout au long du cycle de conception, de fabrication et de contrôle. Les opticiens doivent se saisir de cette question de la représentation numérique *univoque* de leurs objets. C'est d'autant plus vrai qu'il s'agit d'optiques freeforms.

Marchés et applications des freeforms

Les optiques freeforms apparaissent dans tous les domaines de la science ou de l'industrie. Les dernières générations d'optiques de lithographie pour l'Extrême UV conçues et réalisées par Carl ZEISS AG, le sont avec des miroirs freeforms de précision sub-nanométrique. Dans le domaine spatial, Safran Reosc a récemment réalisé les optiques freeforms du spectromètre de l'instrument MicroCarb de monitoring du CO_2 (Fig. 5a). Les freeforms permettront d'embarquer des missions ambitieuses sur des satellites plus petits et moins coûteux, tels les Sentinel du programme Copernicus de l'Union Européenne. En astronomie, les segments du miroir primaire de l'ELT, bien que simplement hors-axes, sont en fait polis de façon robotisée en technologie freeform. Plusieurs instruments de ce télescope géant intégreront des composants freeforms. Le domaine de l'éclairage est aujourd'hui gourmand en projecteurs freeforms à LED de très haute efficacité (Fig. 5b). Nos voitures sont équipées de phares de plus en plus complexes à base de freeforms, et d'afficheurs tête haute freeforms pour l'aide à la conduite, comme dans les avions de chasse (Fig. 5c).

Figure 5.
(a) Miroir freeform de l'instrument Microcarb (crédit : Safran Reosc) ; (b) Collimateur à LED (crédit : Gaggione) ; (c) Afficheur tête haute, et (d) Visière de casque (crédit : Savimex).

Revenons à la vision : les visières de protection sont des freeforms obtenues par injection de polymères (Fig. 5d) ; une bataille intense est en cours pour la réalité virtuelle, ou mieux, la réalité augmentée qui nous permettra de mélanger monde réel et informations digitales avec le meilleur confort pour l'utilisateur.

Prise de conscience – Dynamique

Après le Center for Freeform Optics aux USA et l'association fo+ en Allemagne, plusieurs industriels et institutions académiques en France se sont regroupés au sein de l'association Freeform Optics – Recherche & Solutions (FO-RS) pour partager des problématiques, initier des travaux de recherche à plusieurs et faire ainsi fructifier les solides atouts dont la France dispose en optique freeform. Des actions de recherche en commun sont initiées, sous forme de stages ou de thèses de doctorat financés par l'association, et des études de démonstration sont lancées. Nous espérons ainsi faire émerger des propositions d'actions ambitieuses et capter des financements.

Conclusion

L'optique instrumentale de nos pères est source d'inspiration et elle évolue à grande vitesse : les optiques freeforms ouvrent de nouveaux champs académiques et industriels à explorer ; elles trouvent leurs applications dans de nombreux domaines, que ce soit pour le grand public, les hautes technologies ou la science fondamentale. La révolution des optiques freeforms est en marche, elle répond à une attente profonde du marché qui requiert toujours plus d'intégration, de performance pour des coûts et des délais d'accès toujours plus faibles. L'optique diffuse dans notre quotidien et y est omniprésente : elle permet de voir en toutes circonstances, de capter l'énergie solaire, d'enregistrer et de véhiculer l'information. Les optiques freeforms sont les vecteurs nouveaux de ces fonctions vitales. Concevoir ces objets, les fabriquer, les mesurer et les intégrer sont les défis de l'opticien de demain.