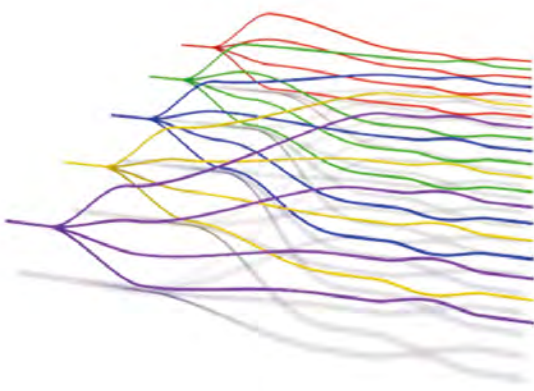


# ASTROPHOTONIQUE : LES DÉFIS À RELEVER POUR LES FUTURES PUCES OPTIQUES DESTINÉES À L'OBSERVATION ASTRONOMIQUE

**Guillermo MARTIN**

Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble, Univ. Grenoble Alpes/CNRS, IPAG, F-38000 Grenoble, France  
\*guillermo.martin@univ-grenoble-alpes.fr



**Pour les applications en astrophotonique, les prochaines générations d'interféromètres et spectromètres intégrés nécessiteront l'exploration de nouvelles technologies de fabrication de guides d'onde. La photo-inscription laser est probablement l'une des alternatives les plus prometteuses en donnant l'accès à la dimension verticale, permettant d'augmenter considérablement le nombre de faisceaux à combiner et de redistribuer des pupilles d'entrée complexes.**

<https://doi.org/10.1051/phys/202211740>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

Plus de détails dans Jovanovic et al., J. Phys. Photonics (2023 - under review)

**D**es récentes découvertes fondamentales en astronomie et astrophysique ont été portées par des instruments optiques (LIGO, GRAVITY) à la pointe de la technologie. Les très fortes performances attendues poussent même certains domaines à une impasse. Par exemple, les spectrographes multi-objets et de champ intégral pour télescopes de très grande taille (ELT), repoussent les limites de ce qui est faisable en termes de taille et coût des instruments. Pour ces raisons, il

est indispensable de trouver des solutions innovantes comme la miniaturisation des instruments optiques, en utilisant les concepts proposés par la photonique. Si la miniaturisation est évidente pour les applications spatiales (gain de poids, volume, et donc de coût), pour l'observation au sol la percée des instruments en optique intégrée se fait plus difficilement. En effet, les solutions photoniques pour les instruments des grands observatoires mettent du temps à émerger pour essentiellement 3 raisons : 1) Difficulté de couplage optique efficace dans les guides monomodes, à faible

ouverture numérique, 2) Coût et effort pour réadapter les connaissances existantes dans l'industrie photonique pour des applications astronomiques de niche, et donc avec peu ou pas de marché derrière et 3) Manque de maturité technologique de certains composants et technologies photoniques, notamment dès qu'on explore des domaines nouveaux (e.g. optique guidée dans le moyen IR ; modulation active de la phase à haute cadence, indépendante de la polarisation).

Il est cependant important de souligner que l'interférométrie à longue base et à grand nombre de ●●●

EDP Sciences lance une nouvelle collection :  
**Institut d'Optique Graduate School Textbook**

Parution le 25/08/2022 du premier ouvrage :

# Optical Models for Material Appearance



This book is an introduction to the fundamental notions of optics which allows to understand the radiometric quantities measured with common devices, to learn how to analyze them, and to review some classical optics-based predictive models for various types of materials and structures.

The author, **Mathieu Hébert**, is professor assistant at Institut d'Optique Graduate School

ISBN 978-2-7598-2647-6

260 pages, 95 €



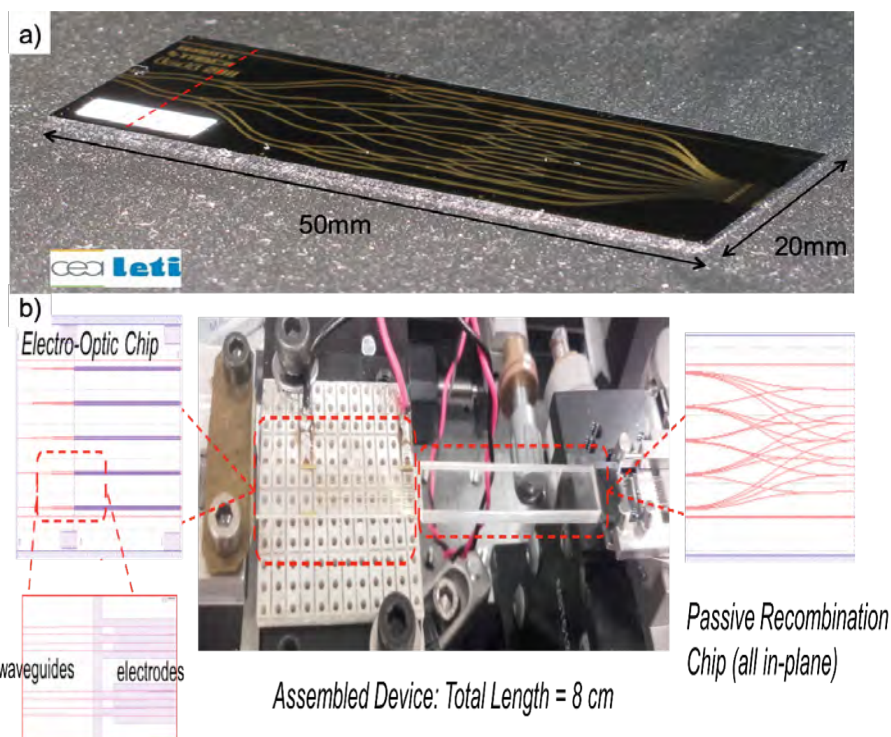
En vente sur [laboutique.edpsciences.fr](http://laboutique.edpsciences.fr)  
(section des livres en anglais)

télescopes semble l'alternative la plus robuste pour aborder le problème d'imagerie astronomique dans le domaine VIS et IR, à partir du moment où les résolutions angulaires demandent des diamètres de télescope de l'ordre de la centaine de mètres.

### STATUT - LA PERCÉE DE GRAVITY

L'une des premières applications évidentes de l'optique intégrée est la recombinaison d'un nombre important de télescopes (typ. >4), car l'optique de volume devient alors de plus en plus complexe en termes d'alignement optique, de stabilité, d'équilibre de chemin optique. S'est développée ainsi l'interférométrie optique à longue base (OLBI), qui combine les signaux de télescopes séparés de plusieurs dizaines de mètres et permet de reconstruire des images des objets, avec la résolution spatiale du miroir synthétique dont l'ouverture est dimensionnée par la séparation entre les télescopes. Il est alors possible d'obtenir une image de l'environnement proche de l'étoile, avec des résolutions angulaires inférieures à 1 milliseconde d'arc, sans utiliser de télescopes monopupilles de très grand diamètre (idéalement 100m) mais un ensemble de télescopes de diamètre inférieur (<10m) mais de très grande séparation. Ainsi, aux longueurs d'onde visibles et proches de l'infrarouge (dans la gamme [0,5-2,5]  $\mu\text{m}$ ), l'OLBI est régulièrement utilisée au Very Large Telescope Interferometer (VLTI, Chili), au CHARA Array (Californie), et aux réseaux NPOI et LBTI (Arizona). Une résolution aussi fine ouvre la voie à l'étude d'environnements complexes et à la détermination précise des diamètres angulaires de milliers d'étoiles sur le diagramme de Hertzsprung-Russell, ce qui est inestimable à l'ère de Gaia et des missions spatiales comme PLATO ou ARIEL.

Alors que cette technique a longtemps été entravée par sa sensibilité limitée (la lumière n'est pas collectée par le miroir synthétique géant, mais



**Figure 1.** a) Puce optique pour l'instrument Gravity (4T Passif,  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ ) [1] ; b) Puce optique pour l'instrument FIRST (5T actif, Hybride  $\text{LiNbO}_3/\text{Borosilicate}$ ) [2].

par l'ensemble des sous-ouvertures, télescopes de diamètres bien inférieurs à leur séparation), GRAVITY au VLTI (Fig. 1a) [1] a révolutionné l'interférométrie proche infrarouge en fournissant des images avec une résolution angulaire de l'ordre de la milli-arcseconde sur des objets faiblement lumineux ( $10^{-8}$  par rapport au soleil), en plus des capacités de polarimétrie et de spectroscopie.

### DÉFIS ACTUELS ET FUTURS

#### Augmenter le nombre de faisceaux

L'imagerie instantanée d'environnements variables et complexes fait de la recombinaison de plus de 4 télescopes un moteur clé pour les prochains développements photoniques, avec des défis concernant la longueur, la transmission globale et la complexité des puces interférométriques. Comme condition préalable, la conception du circuit

optique et le rapport signal sur bruit obtenu, doivent être optimisés. A titre d'exemple, l'interféromètre optique à six télescopes (6T ABCD) conçu pour le suiveur de franges de l'instrument SPICA visible au réseau CHARA optimise le codage des 15 motifs de franges. Cette puce de 82 mm de long présente une transmission supérieure à 50 % pour les deux polarisations sur toute la bande H. Des développements similaires sont en cours pour les interféromètres déployés sur des télescopes monolithiques, tels que les instruments de redistribution de pupille. Actuellement, un interféromètre à 5 voies, monomode dans le visible avec modulation active de la phase intégrée dans la puce, est en cours d'optimisation pour l'instrument FIRST (Fig. 1b) [2], et un interféromètre en frange noire dans le domaine infrarouge est en cours de développement pour l'instrument GLINT. L'augmentation du nombre de faisceaux d'entrée pour améliorer les capacités d'imagerie des futurs instruments se fera au prix d'une plus grande complexité et d'une dégradation du rapport signal à bruit.

### Amélioration de la transmission

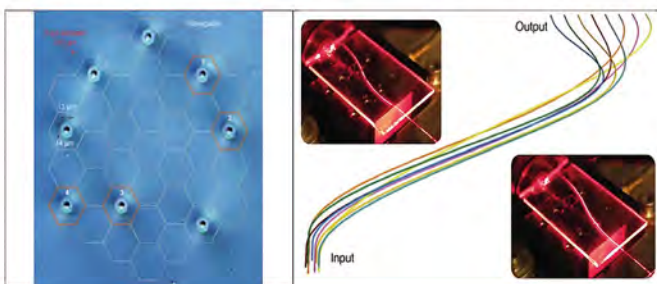
L'amélioration de la sensibilité de l'OLBI nécessite de pousser la sensibilité des puces interférométriques en améliorant la transmission intrinsèque des matériaux, le couplage de la lumière dans les guides d'ondes et la collection de la lumière en sortie. Si la transmission intrinsèque des matériaux est plus difficilement maîtrisable, la fabrication de guides d'ondes à grand contraste d'indice permet de mieux confiner la lumière, de mettre en œuvre des rayons de courbure plus petits et ainsi de réaliser des fonctions optiques plus courtes, conduisant à des puces plus compactes. Cela permet de relever le défi potentiel de la taille limitée du wafer et de la transmission globale. En tant que sous-produit, des puces plus compactes pourraient être plus facilement conditionnées et refroidies, notamment pour les applications cryogéniques et spatiales. Enfin, des fonctions optiques plus compactes ouvrent la possibilité d'intégrer plus de capacités sur une seule puce (lasers pour la métrologie, détecteur on-chip ou encore contrôle actif de la phase et la photométrie [3]).

### LES PROGRÈS DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE POUR RELEVER LES DÉFIS

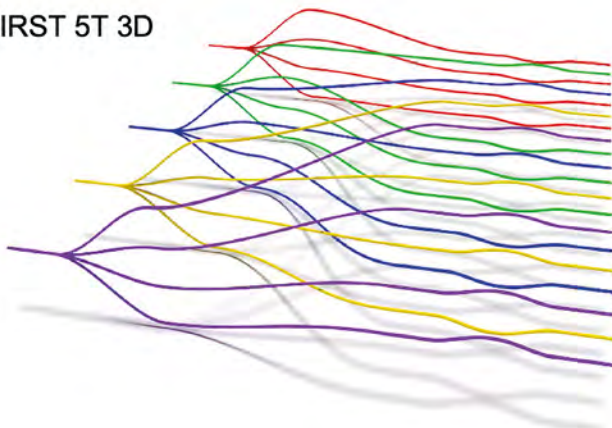
#### Vers la 3D : Permettre des conceptions multicanaux et multibandes complexes

Pour plus de 8 télescopes, les puces lithographiques planaires nécessitent des tailles de wafers dépassant les limites technologiques actuelles lors de l'utilisation de guides d'ondes à faible différence d'indice (typ. 0,001). Une option consiste à utiliser des guides d'ondes à contraste d'indice de réfraction élevé (par exemple, les technologies SiN/SiO<sub>2</sub> avec  $\Delta n = 0,5$ ), où le confinement élevé permet des courbures plus fortes (rayons de plusieurs dizaines de microns), et donc des dispositifs compacts avec de multiples fonctions optiques (division du faisceau, couplage directionnel, multiplexage en longueur d'onde). Le problème qui se pose est que les guides d'ondes à grande ouverture numérique (ON) nécessitent des tapers pour maximiser le couplage entre le mode guidée (typ. quelques 100nm) avec les modes des fibres d'entrée/sortie (typ. autour de 10µm). Ces tapers ont une transmission fortement dépendante de la polarisation, ce qui nécessite des efforts ●●●

### DRAGONFLY



### FIRST 5T 3D



**Figure 2.** Haut : Exemple d'une redistribution de pupille 2D vers 1D (Dragonfly [5]) ; Bas : Concept de puce 3D pour l'instrument FIRST : 5 entrées, division du flux en 4, puis recombinaison deux à deux (par couplage directionnel) sans croisement dans le plan.



## Bancs de caractérisation par la lumière

**COMPOSANTS**

- Monochromateurs
- Sources : UV, VIS, IR
- Détecteurs
- Amplificateurs

**BANCS MODULABLES**

- Caractérisation de sources
- Propriétés optiques des matériaux
- Risque photobiologique
- Cosmétique
- Photovoltaïque



Spectroradiomètre haute-sensibilité



Banc de mesure de transmission sur fibre optique



Design d'un double Monochromateur

Distributeur officiel de :



Light.  
Measurement.  
Excellence.

**Trioptics France**

76 rue d'Alsace  
69100 Villeurbanne  
Tel. 07 72 44 02 03  
Fax : 04 72 44 05 06  
[www.trioptics.fr](http://www.trioptics.fr)

spécifiques comme le développement de convertisseurs de mode indépendants de la polarisation réalisant des transitions adiabatiques d'ON élevée à faible.

Grâce à la technique de photo-inscription laser (Ultrafast Laser Inscription, ULI, [4], l'indice de réfraction d'un substrat peut être modifié localement, notamment à différentes profondeurs dans le substrat. L'intérêt est que cette technique peut être appliquée à une large variété de matériaux, permettant ainsi des dispositifs optimisés pour différentes bandes de longueur d'onde. La polyvalence de l'ULI permet une architecture de guide d'ondes 3D, des nouvelles conceptions sont alors possibles, avec un grand nombre d'entrées, soit en ligne, soit en matriciel (Fig.2) et évitant les croisements dans le plan au moment de recombinaison des faisceaux, réduisant ainsi la diaphonie et les pertes de propagation.

Un grand nombre de briques de base ont été démontrées en utilisant cette technologie : dispositifs de conversion multimode - monomode (comme les lanternes photoniques), redistribution de pupille, en convertissant une matrice d'entrée 2D en un réseau 1D (Dragonfly [5]) ou encore la réalisation de coupleurs directionnels 3D. Les défis de l'ULI incluent la stabilisation de la puissance du laser pendant la fabrication du guide d'onde, et en particulier pour l'écriture de guides d'ondes profondément dans le substrat, car la puissance et le point de focalisation doivent être finement réglés pour assurer l'homogénéité de la modification de l'indice de réfraction.

### INTÉGRATION SUR PUCE DE LA MODULATION.

Des fonctions actives à base de matériaux électro-optiques, thermo-optiques ou piézo-optiques sont également développées pour permettre des modifications de l'indice effectif du mode guidé, et donc un contrôle actif de la phase, à des fréquences atteignant le MHz. Ce type

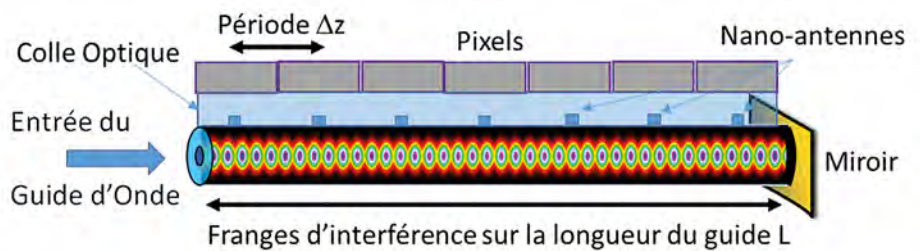


Figure 3. Concept du Spectromètre SWIFTS.

de dispositif hybride permet non seulement la modulation de phase sur puce, mais également le suivi des franges ou de la différence de marche nulle [3]. Le contrôle on-chip de la photométrie et de la phase, sont des outils indispensables pour mener à bien des projets d'interférométrie en frange noire, destinées à la détection d'exoplanètes par extinction virtuelle de l'étoile hôte à condition d'atteindre des taux d'extinction supérieurs à 40dB (voire 60dB). Cette approche est aujourd'hui au cœur de projets de recherche astronomique, tels que SciFY ou LIFE.

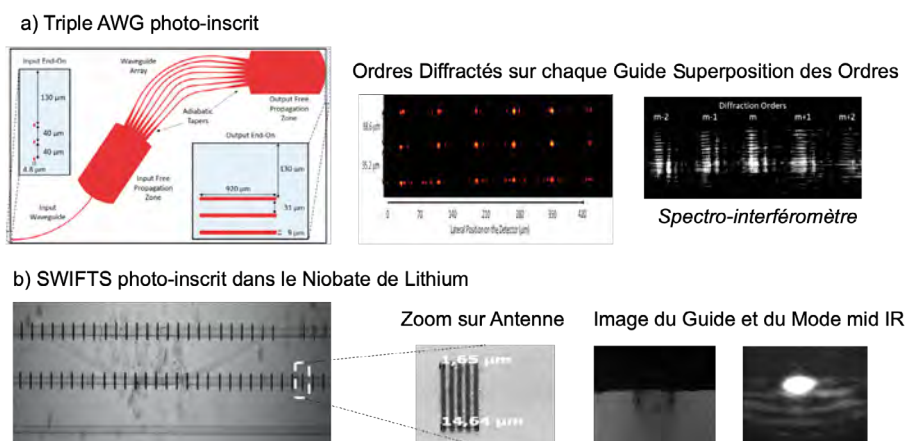
### INTÉGRATION SUR PUCE DE LA SPECTROMÉTRIE

Dans la totalité des instruments actuels, utilisant des puces optiques (GRAVITY, FIRST...) le signal est extrait en sortie de la puce et dispersé spectralement à l'aide d'un prisme

ou un réseau, sur un détecteur. Une piste à explorer est l'insertion de la fonction spectrométrique directement dans la puce. Des développements autour de spectromètres type SWIFTS [6] ou AWG [7] sont aujourd'hui en cours pour insérer cette fonction directement sur chacune des voies de sortie.

Dans le cas du SWIFTS (Stationary Wave Integrated FT spectrometer), une onde stationnaire est obtenue dans un guide d'onde monomode par superposition d'une onde propagative avec une onde contra-propagative (p.ex. à l'aide d'un miroir en bout de guide). L'échantillonnage périodique de ce signal, à l'aide de nano-discontinuités diélectriques, couplées à des pixels collés au-dessus du guide, permet d'enregistrer l'interférogramme sans aucune pièce mobile ni optique de relais (Fig. 3). Il est alors uniquement besoin de faire une TF pour remonter au spectre à analyser. Des résolutions de  $R > 10000$  peuvent être obtenues avec seulement 10mm

Figure 4. Exemples de réalisation de spectro-interféromètres par photo-inscription laser, a) Empilement de trois AWG, avec les ordres de sortie observés sur chaque niveau, puis leur superposition [7]; b) SWIFTS photo-inscrit dans le niobate de lithium, avec zoom sur les antennes, et sur la couronne de contraste d'indice permettant de définir le guide.



de guide. L'étendue spectrale, limitée à quelques dizaines de nm par la distance inter-pixels (typ. 20 $\mu$ m), peut être augmentée virtuellement grâce à la modulation active de la phase (multiplexage temporel) ou l'utilisation de centres d'échantillonnage décalés sur des guides en parallèle (multiplexage spatial) :

Dans le cas des AWG (Arrayed Waveguide Gratings), l'étalement spectral est directement obtenu à la sortie du guide, en utilisant une superposition des guides de longueurs croissantes.

Dans les deux cas, les nouvelles méthodes de fabrication (ULI) permettent d'envisager des dispositifs 3D, avec empilement des AWG ou encore la réalisation de spectro-interféromètres SWIFTS, dans un volume très compact, sans avoir recours à une dispersion spectrale en sortie du composant, comme historiquement réalisé.

### CONCLUSION

Ces dernières années, l'astronomie a grandement bénéficié de l'arrivée à maturité des technologies photoniques pour la combinaison de faisceaux, ouvrant de nouvelles opportunités pour l'interférométrie optique à longue base. Le renforcement des collaborations entre équipes de recherche et centres technologiques permettent désormais la fabrication de composants avec des technologies matures, et une synergie dynamique pour aborder le développement et/ou l'optimisation

de circuits spécifiques (notamment pour les bandes spectrales non standard), incluant de nouvelles fonctions. L'avènement de projets de redistribution de pupille à haute densité (les 30 entrées complètes de l'instrument FIRST sur le télescope SUBARU, le projet SPIDER avec 518 sous-ouvertures) nécessitant des facettes d'entrée avec des dizaines de guides d'ondes dans une distribution matricielle 2D de taille millimétrique sera difficile, car la modification de l'indice de réfraction doit être homogène quelle que soit la profondeur sur le substrat. Les prochaines générations d'interféromètres nécessiteront l'exploration de nouvelles technologies car le diamètre du wafer requis pour des circuits photoniques planaires à multiples entrées devient limitante. Le procédé ULI est probablement l'une des alternatives les plus prometteuses en donnant l'accès à la dimension verticale, permettant de réduire longueur totale du circuit, de produire des tapers 3D et des guides d'ondes qui sont en principe indépendants de la polarisation. Cette méthode est également bien adaptée à la fabrication de guides d'ondes dans des matériaux actifs ou ayant des fenêtres de transparence où les techniques de lithographie classiques ne sont pas fonctionnelles. ●

*REMERCIEMENTS : L'auteur remercie K. Perraut, L. Jocou, E. Huby et D. Mourard pour l'aide à la rédaction de cet article.*

### RÉFÉRENCES

- [1] GRAVITY Collaboration: Abuter *et al.*, *Astron. Astrophys.* **602**, 94 (2017)
- [2] G. Martin *et al.*, "Hybrid electro-optic visible multi-telescope beam combiner for next generation FIRST/SUBARU instruments", *Proc SPIE* 12188 (2022)
- [3] G. Martin, S. Heidmann, J-Y Rauch, L. Jocou and N. Courjal, *Opt. Eng.* **53**, 034101, (2014)
- [4] K. M. Davis, K. Miura, N. Sugimoto, K. Hirao, *Opt. Lett.* **21**, 1729 (1996)
- [5] N. Jovanovic *et al.*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **427**, 806, (2012)
- [6] E. Le Coarer, S. Blaize, P. Benech *et al.*, *Nat. Phot.* **1**, 473 (2007)
- [7] G. Douglass, A. Arriola, I. Heras *et al.*, *Opt. Express* **26**, 18470 (2018)

REDBACK SYSTEMS

par **OPTON LASER**  
INTERNATIONAL

## Spectromètre Echelle couplé par fibre



- ▲ Haute résolution et efficacité
- ▲ Conception compacte & robuste
- ▲ Coût abordable
- ▲ Logiciel de contrôle + SDK Python



- ▲ Gamme spectrale : 400-950nm
- ▲ Résolution spectrale : ~16 pm (FWHM) @632.8nm
- ▲ Dimensions : 205mm x 390mm
- ▲ Interface : USB3.0

Astronomie | Physique quantique  
| Spectroscopie de haute résolution



Votre contact :

Elias.Akiki@optonlaser.com



www.optonlaser.com